

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Автомобильный двигатель с искровым зажиганием на спиртовом топливе

Студент(ка)	<u>Попов Никита Сергеевич</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
Руководитель	<u>В.В. Смоленский</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
Консультант	<u>М.И. Фесина</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
Нормоконтроль	<u>А.Г. Егоров</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>

**Допустить к защите**  
Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., Д.А. Павлов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

2016 г.

## ЗАДАНИЕ

### на выполнение бакалаврской работы

Студент Попов Никита Сергеевич

1. Тема работы Автомобильный двигатель с искровым зажиганием на спиртовом топливе

2. Срок сдачи студентом законченной работы 16-22 июня 2016 года, согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2015-2016 уч. год.

3. Исходные данные к работе  $V_L = 1.5$  л;  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>;  $i = 4$  – число цилиндров;  $\tau = 4$  – тактность;  $\varepsilon = 10,5$  – степень сжатия,  $\alpha = 1$  на всех режимах работы двигателя. При частотах вращения коленчатого вала:  $n_{\min} = 900$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>,  $n_M = 2600$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup>,  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>, На базе ВАЗ.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) \_\_\_\_\_

Введение;

Спирт как топливо для двигателей с искровым зажиганием

Тепловой расчет двигателя;

Расчет кинематики двигателя;

Расчет динамики двигателя;

Специальная часть

Безопасность и экологичность проекта

Расчет основных деталей двигателя;

Расчет механизмов и систем двигателя;

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала

Продольный и поперечный разрез двигателя - 2 листа формата А1

ВСХ - 1 лист формата А1

Диаграммы теплового расчета - 1 лист формата А1

Диаграмма кинематического и динамического расчетов - 2 листа формата А1

Конструкторский чертеж детали - 1 лист формата А1;

Сборочный чертеж поршня - 1 лист формата А1;

6. Консультант по нормоконтролю – д.т.н., профессор Егоров А.Г.

По разделу "Безопасность и экологичность работы"

к.т.н., профессор Фесина М.И.

7. Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Руководитель бакалаврской работы \_\_\_\_\_

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

(подпись)

Н.С. Попов

(И.О. Фамилия)

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «Тольяттинский государственный университет»  
Институт энергетики и электротехники  
Энергетические машины и системы управления

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_ Д.А. Павлов  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**  
**выполнения бакалаврской работы**

Студента Попов Никита Сергеевич  
 по теме Автомобильный двигатель с искровым зажиганием на спиртовом топливе

№ этапов работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
5	Описание конструкции спроектированной установки	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
6	Безопасность и экологичность работы	Раздел записки	10 июня 2016 г.	90%		
7	Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты	Сброшюрованная записка и подписанные чертежи	10 июня 2016 г.	100%		

Студент \_\_\_\_\_ Н.С. Попов  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 Руководитель \_\_\_\_\_ В.В. Смоленский  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## АННОТАЦИЯ

Данная бакалаврская работа состоит из семи частей. В первой части проекта представлено описание свойств спирта в качестве моторного топлива для ДВС с искровым зажиганием, во второй части проведен тепловой расчет двигателя, в третьей кинематический расчет, в четвертой динамический расчет, в пятой прочностной расчет основных деталей двигателя, в шестой дано описание конструкции двигателя спроектированного двигателя, проведен анализ его эффективности и токсичности и в седьмой проведен анализ безопасности и экологичности объекта бакалаврской работы, в приложении приведен расчет систем двигателя.

Пояснительная записка к бакалаврской работе состоит из 101 стр.

Графическая часть работы содержит 7 листов формата А1. Продольный и поперечный разрез двигателя, чертеж поршня спроектированного двигателя, лист ВСХ, три листа диаграмм.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	8
1 Спирт как топливо для двигателей с искровым зажиганием .....	9
2 Тепловой расчет двигателя.....	11
2.1 Топливо.....	11
2.2 Параметры рабочего тела.....	11
2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы.....	12
2.4 Расчет процесса впуска.....	13
2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси	14
2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания.....	15
2.7 Расчет процессов расширения и выпуска.....	18
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла.....	20
2.9 Расчет эффективных показатели двигателя.....	21
2.10 Тепловой баланс двигателя.....	23
3 Кинематический расчет.....	25
4 Динамический расчет.....	26
4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма.....	26
4.2 Удельные и полные силы инерции.....	27
4.3 Удельные суммарные силы.....	27
4.4 Крутящие моменты .....	28
4.5 Силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала.....	29
4.6 Силы, действующие на колено вала .....	30
5 Расчет основных деталей двигателя.....	32
5.1 Расчет поршневой группы.....	32
5.1.1 Расчет поршня.....	32
5.1.2 Расчет поршневого кольца.....	34
5.1.3 Расчет поршневого пальца.....	35
6 Сравнительный анализ спроектированного двигателя .....	38

6.1 Особенности применения спирта как моторное топливо .....	38
7 Безопасность и экологичность проекта.....	43
7.1 Пожарная безопасность автомобиля .....	43
7.1.1 Требования пожарной безопасности к системе питания .....	45
7.1.2 Требования пожарной безопасности к электрооборудованию .....	47
7.2 Нормы по ограничению токсичности отработавших газов автотранс- портных ДВС .....	47
7.3 Выводы по разделу безопасность и экологичность .....	50
Заключение .....	51
Список использованных источников.....	52
Приложение А - Результаты теплового расчета.....	55
Приложение Б - Результаты кинематического расчета.....	66
Приложение В - Результаты динамического расчета.....	68
Приложение Г - Результаты расчетов сил действующих в КШМ.....	74
Приложение Д – Расчет основных систем двигателя .....	87
Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа.....	100

## ВВЕДЕНИЕ

Мировой топливный кризис, из-за которого подскочили цены на бензин и дизтопливо, вновь заставляет задуматься об иных источниках энергии для транспортных средств. Неплохая альтернатива традиционному топливу – спирт.

В современном автомобилестроении существуют различные тенденции решения проблем экологической безопасности. Разрабатываются автомобили с электроприводом, однако в настоящее время электропривод, как силовой агрегат автомобиля, не заменит традиционный ДВС в силу недостаточного уровня потребительских качеств. Применение альтернативных топлив не решает полностью проблем токсичности автомобильных двигателей и сдерживается проблемами, связанными с инфраструктурой и дороговизной этих технологий. Широко распространенные системы каталитической нейтрализации ОГ с использованием благородных металлов являются дорогостоящими и снижают эффективность работы двигателя.

Наиболее эффективные методы снижения токсичности ДВС связаны с комплексным воздействием как на рабочий процесс, т.е. непосредственно на причины образования токсичных веществ, так и направленные на очистку выхлопных газов. В частности, применением альтернативного вида топлива - спирта. Этот способ не требует значительного усложнения конструкции автомобиля и не ухудшает безопасность.

## 1 Спирт как топливо для двигателей с искровым зажиганием

Среди различных спиртов и их смесей наибольшее распространение в качестве моторного топлива получили метанол и этанол. Их основными недостатками являются пониженная теплота сгорания, высокая теплота испарения и низкое давление насыщенных паров, но в целом по моторным свойствам этанол лучше метанола.

Высокие антидетонационные качества определяют преимущественное использование спиртов в двигателях внутреннего сгорания с принудительным (искровым) зажиганием. При этом основные мероприятия по переводу автомобилей на работу на чистых спиртах сводятся к увеличению вместимости топливного бака (в случае необходимости сохранения беззаправочного пробега), увеличению степени сжатия двигателя до 12 - 14 с целью полного использования детонационной стойкости топлива и перерегулировки карбюратора на более высокие его расходы (в соответствии со стехиометрическим коэффициентом) и большую степень обеднения смеси. Низкое давление насыщенных паров и высокая теплота испарения спиртов делают практически невозможным запуск карбюраторных двигателей уже при температурах ниже  $+10^{\circ}\text{C}$ . Для улучшения пусковых качеств в спирты добавляют 4 - 6% изопентана или 6 - 8% диметилового эфира, что обеспечивает нормальный пуск двигателя при температуре окружающего воздуха от  $-20$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ . Для этой же цели спиртовые двигатели оборудуются специальными пусковыми подогревателями. При неустойчивой работе двигателя на повышенных нагрузках из-за плохого испарения спиртов требуется дополнительный подогрев топливной смеси с помощью, например, отработавших газов.

С энергетической точки зрения преимущества спиртов заключаются главным образом в высоком к. п. д. рабочего процесса и высокой детонационной стойкости. Величина к. п. д. спиртового двигателя выше бензинового во всем диапазоне рабочих смесей, благодаря чему удельный расход энергии на единицу мощности снижается.

При использовании спиртовых топлив снижается содержание контролируемых вредных компонентов отработавших газов автомобиля. Благодаря низким температурам горения спиртов на единицу расходуемой энергии и топлива выделяется значительно меньше, чем у бензина оксидов азота. Одновременно вследствие улучшения полноты сгорания спиртовых смесей выбросы CO и CH<sup>\*</sup> также уменьшаются. Выбросы канцерогенных ароматических углеводородов также на порядок ниже, чем при работе двигателя на бензине.

Наряду с положительной экологической эффективностью использования спиртовых топлив следует отметить и такие негативные явления, как повышенные выбросы альдегидов и испарения углеводородных соединений. Содержание альдегидов растет с увеличением концентрации спиртов в топливной смеси. Для метанола характерны выбросы формальдегида, в то время как при сгорании этанола образуется преимущественно ацетальдегид. Минимальные выбросы альдегидов соответствуют стехиометрическому составу топливной смеси и возрастают при ее обеднении или обогащении. В среднем выбросы альдегидов при работе на спиртах примерно в 2 - 4 раза выше, чем при работе двигателя на бензине. Их снижения добиваются при добавке к спиртам воды (до 5%) и присадок к топливу до 0,8% анилина, подогреве воздуха на входе в двигатель.

Эксплуатационные свойства метанольного топлива, и в первую очередь энергетические показатели и пусковые качества, улучшаются при дополнительном вводе высших спиртов и эфиров. Такие топлива получили название смесевых спиртовых топлив. Испытания одной из композиций смесевое топлива показали увеличение мощности двигателя на 4 - 7% и улучшение топливной экономичности (в сравнении с чистым метанолом) - на 10 - 15%, при этом содержание в отработавших газах оксидов азота снижается на 25 - 30% в сравнении с работой на бензине.

## 2 Тепловой расчет двигателя

Произведем расчет четырехтактного двигателя с впрыском спирта, предназначенного для легкового автомобиля по методике Вибе. [16]

Исходные данные:  $V_L = 1.5$  л;  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>;  $i = 4$  – число цилиндров;  $\tau = 4$  – тактность;  $\varepsilon = 10,5$  – степень сжатия,  $\alpha = 1$  на всех режимах работы двигателя. При частотах вращения коленчатого вала:  $n_{\min} = 900$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>,  $n_M = 2600$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup>,  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>.

### 2.1 Топливо

В соответствии с темой бакалаврской работы в качестве топлива применяется спирт этиловый –  $\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})$ .

Средний элементарный состав и молекулярная масса топлива:  $C = 0,4117$ ;  $H = 0,1176$ ,  $O = 0,4706$  и  $m_T = 34$  кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания топлива:

$$H_u = 33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51 \cdot (9H + W); \text{ кДж/кг} \quad (2.1)$$

$$H_u = 33,91 \cdot 0,4117 + 125,6 \cdot 0,1176 - 10,89 \cdot 0,4706 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,1176 = 20957,1 \text{ кДж/кг.}$$

### 2.2 Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left( \frac{0,4117}{12} + \frac{0,1176}{4} - \frac{0,4706}{32} \right) = 0,2356 \frac{\text{кмоль.возд}}{\text{кмоль.топл.}} \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} \cdot 0,4117 + 8 \cdot 0,1176 - 0,4706 \right) = 6,82 \frac{\text{кг.возд}}{\text{кг.топл.}} \quad (2.3)$$

Количество горючей смеси:

$$M_1 = \alpha L_0 + 1/m_T; \text{ кмоль гор. см/кг топл.} \quad (2.4)$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при  $\alpha \geq 1$ :

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}; \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл}; \quad (2.5)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}; \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл}; \quad (2.6)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0; \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл}. \quad (2.7)$$

Общее количество продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2}; \text{ кмоль пр.сг/кг топл}. \quad (2.8)$$

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

$$\mu_0 = M_2 / M_1 \quad (2.9)$$

Результаты расчета параметров рабочего тела приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Параметры рабочего тела

$n, \text{ мин}^{-1}$	$\alpha$	$M_1, \text{ кмоль гор.см./кг топл.}$	$M_{CO_2}, \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл.}$	$M_{CO}, \text{ кмоль } CO/\text{кг топл.}$	$M_{H_2O}, \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл.}$	$M_{H_2}, \text{ кмоль } H_2/\text{кг топл.}$	$M_{N_2}, \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл.}$	$M_2, \text{ кмоль пр.сг./кг топл.}$	$\mu_0$
900	1	0,2651	0,03431	0	0,05882	0	0,18665	0,2797	1.055
1500	1	0,2651	0,03431	0	0,05882	0	0,18665	0,2797	1.055
2600	1	0,2651	0,03431	0	0,05882	0	0,18665	0,2797	1.055
5000	1	0,2651	0,03431	0	0,05882	0	0,18665	0,2797	1.055
5600	1	0,2651	0,03431	0	0,05882	0	0,18665	0,2797	1.055
Двигатель ВА3-2112									
900	0.96	0,5048	0,0655	0,0057	0,0696	0,0029	0,3923	0,536	1,063
2600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.052
3700	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.052
5000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.052
5600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.052

### 2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Атмосферные условия:  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $T_0 = 293 \text{ К}$ .

Давление остаточных газов:

$$p_r = p_k(1,035 + A_p \cdot 10^{-8} n^2), \quad (2.10)$$

где  $p_{rN} = 1,18p_0 = 1,18 \cdot 0,1 = 0,118 \text{ МПа}$ ;

$$A_p = (p_{rN} - p_0 \cdot 1,035) 10^8 / (n_N^2 p_0).$$

Результаты расчета параметров окружающей среды и остаточных газов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры окружающей среды и остаточных газов

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_k$ , К	$p_k$ , Мпа	$T_r$ , К	$p_r$ , Мпа
900	1,189	293	0,1	1100	0,103834
1500	1,189	293	0,1	1135	0,105349
2600	1,189	293	0,1	1185	0,109164
5000	1,189	293	0,1	1280	0,118
5600	1,189	293	0,1	1320	0,121274
Двигатель ВА3-2112					
900	1,189	293	0,1	1080	0,109
2600	1,189	293	0,1	1161	0,112
3700	1,189	293	0,1	1245	0,114
5000	1,189	293	0,1	1265	0,116
5600	1,189	293	0,1	1305	0,118

## 2.4 Расчет процесса впуска

С целью получения хорошего наполнения двигателя температура подогрева свежего заряда на номинальном скоростном режиме принимается  $\Delta T_N = 8^\circ\text{C}$ . Тогда,  $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N) = 8 / (110 - 0,0125 \cdot 5600) = 0,2$ ;

$$\Delta T = A_T(110 - 0,0125n) = 0,2 (110 - 0,0125n) = 22 - 0,0025n. \quad (2.11)$$

Плотность заряда на впуске:

$$\rho_k = p_k \cdot 10^6 / (R_B T_k) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 293) = 1,189 \text{ кг/м}^3.$$

Потери давления на впуске. В соответствии со скоростным режимом двигателя ( $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$ ) и при условии качественной обработки внутренней поверхности впускной системы можно принимается  $\beta^2 + \xi_{ВП} = 2,8$  и  $w_{ВП} = 95 \text{ м/с}$ . Тогда,  $A_n = w_{ВП} / n_N = 95 / 5600 = 0,01696$ ;

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{ВП}) A_n^2 n^2 \rho_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}. \quad (2.12)$$

Давление в конце впуска:

$$p_a = p_k - \Delta p_a; \text{ МПа}. \quad (2.13)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_k + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r} = \frac{293 + 8}{1060} \cdot \frac{0,118}{9,9 \cdot 1,1 \cdot 0,085 - 0,118} = 0,0415, \quad (2.14)$$

где  $\varphi_{оч}$  – коэффициент очистки;  $\varphi_{доз}$  – коэффициент дозарядки.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_k + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r); \text{ К}. \quad (2.15)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_k}{T_k - \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_k} (\varphi_{доз} \cdot \varepsilon \cdot p_a - \varphi_{оч} \cdot p_r) \quad (2.16)$$

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8.314 \cdot 10^{-3} \left[ \left( \alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a \right] / \left( \kappa + \alpha \cdot l_0 \cdot p_a \right) \quad (M^3), \quad (2.17)$$

где  $\mu_B = 28,9$  молярная масса воздуха.

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет процесса впуска

n, мин <sup>-1</sup>	ΔT, °C	Δp <sub>а</sub> , Мпа	p <sub>а</sub> , Мпа	φ <sub>оч</sub>	φ <sub>доз</sub>	γ <sub>г</sub>	T <sub>а</sub> , К	η <sub>v</sub>	V <sub>а</sub> , К
900	44,71875	0,00599	0,094	1,08	1	0,0318	323,2104	0,859	0,942
1500	38,25	0,01012	0,0898	1,02	1,05	0,0293	320,799	0,917	0,984
2600	16,5625	0,01202	0,0879	0,98	1,1	0,0276	321,4435	0,940	1,007
5000	10	0,01664	0,0833	0,96	1,15	0,0277	326,3013	0,877	1,079
5600	8,125	0,02201	0,0779	0,94	1,2	0,0305	330,92	0,8806	1,168
Двигатель ВАЗ-2112									
900	19,75	0,0057	0,0942	1	0,85	0,0431	344,4703	0,721	1,0004
2600	15,5	0,01027	0,0897	0,94	0,93	0,0362	338,3532	0,770	1,034
3700	12,75	0,01358	0,0864	0,98	1	0,0337	336,4559	0,804	1,067
5000	9,5	0,01605	0,0839	0,81	0,95	0,0299	330,4714	0,758	1,079
5600	8	0,01942	0,08057	0,77	0,94	0,0297	330,0071	0,721	1,122

## 2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

$$\mu = (\mu_o + \gamma_r) / (1 + \gamma_r) \quad (2.18)$$

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений

$$n_1 = 1 + \frac{8.314}{20.16 + 1.738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a} \quad (2.19)$$

Давление, температура и удельный объем в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \quad \text{МПа} . \quad (2.20)$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad \text{К} . \quad (2.21)$$

Удельный объём, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, при угле опережения зажигания  $\Theta$ ,

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[ 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \right\} - \left\langle \cos \Theta \right\rangle + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \langle \sin \Theta \rangle^2} \right] \right]; \quad (2.22)$$

$$P_y = P_a \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_l}; \text{ МПа}; \quad T_y = T_a \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_l - 1}; \text{ К}; \quad (2.23)$$

Результаты расчета процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\mu$	$n_l$	$P_c$ , МПа	$T_c$ , К	$\Theta^\circ$ ПКВ	$V_y$ , м <sup>3</sup> /кг	$P_y$ , МПа	$T_y$ , К
900	1,0508	1,3756	2,7055	808,878	15	0,1008	2,033	748,24
1500	1,0184	1,37545	2,5855	802,549	22	0,1204	1,616	705,99
2600	1,0184	1,37603	2,5345	805,302	26	0,1472	1,241	662,584
5000	1,0184	1,3756	2,3988	816,614	29	0,1892	0,914	627,63
5600	1,0282	1,3756	2,2443	828,173	32	0,2239	0,756	615,408
Двигатель ВАЗ-2112								
900	1,0604	1,37058	2,3646	823,349	15	0,1151	1,823	767,52
2600	1,0505	1,372	2,2593	811,43	20	0,1347	1,469	722,17
3700	1,0507	1,3728	2,18	808,402	23	0,1509	1,267	697,71
5000	1,0509	1,37378	2,1227	795,855	26	0,1660	1,098	665,27
5600	1,0509	1,3753	2,0447	797,582	28	0,1829	0,977	652,08

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры рабочего тела рассчитываются по аналогичным формулам.

## 2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания

Коэффициент выделения теплоты  $\delta$ , учитывающий неполное сгорание топлива;

$$\delta = \frac{H_U - 119950 \alpha L_o}{H_U}; \quad (2.24)$$

где  $H_U$  (кДж/кг) – низшая теплота сгорания;  $L_o$  (кмоль возд./кг топлива) – теоретическое количество воздуха необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

Коэффициент эффективности сгорания топлива  $\xi$ :

$$\xi = \delta^* \Psi; \quad (2.25)$$

Удельная теплота сгорания рабочей смеси

$$q_z = \frac{\xi^* H_u}{\gamma_r + \xi^* l_0 + 1}; \text{ кДж/кг.} \quad (2.26)$$

$$E_2 = \left( 0.002 \frac{\varepsilon}{V_a} \right) q_z; \text{ МПа.} \quad (2.27)$$

Давление газов в процессе сгорания

$$P_2 = \frac{E_2 \Delta X_{1-2} + P_1 \cdot (K_{1-2} \psi_{\phi'_1} - \psi_{\phi'_2})}{K_{1-2} \psi_{\phi'_1} - \psi_{\phi'_2}}, \quad (2.28)$$

$$\text{где } \psi_{\phi'} = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left( \cos \phi' + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \phi'} \right) \right]; \quad (2.29)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$X_{1-2} = \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right], \quad (2.30)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2;

$$\Delta X_{1-2} = \frac{1}{2} \left[ \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.31)$$

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2.

$$k_{1-2} = 1.259 + \left[ 76.7 - \left( 13.6 - \frac{14.2}{\alpha} \right) x_{1-2} \right] \frac{1}{T_{1-2}} - \left( 0.0665 - \frac{0.0245}{\alpha} \right) x_{1-2} \quad (2.32)$$

Фактор теплоёмкостей  $K_{1-2}$

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.33)$$

Средняя температура  $T_{1-2}$  на участке 1-2. Здесь температура  $T_2$  определяется методом пробных подстановок.

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.34)$$

Определив  $k_{1-2}$  производят все вычисления для определения  $P_2$ , а затем вычисляют температуру  $T_2$  газов в процессе сгорания по следующей зависимости:

$$T_2 = \frac{T_y P_2 \Psi(\varphi'_2)}{P_y \Psi(\varphi'_2) \mu_{1-2}}, \quad (2.35)$$

где:

$$\Psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} * \sigma; \quad (2.36)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} * \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot (\sin(\varphi'))^2}\right]; \quad (2.37)$$

средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси,

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}; \quad (2.38)$$

$$\text{где } \mu_1 = 1 + \frac{\mu_{0\max} - 1 \left[1 - \exp\left[-6.908 \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r}.$$

Доля выгоревшего топлива  $\chi$  рассчитывается по уравнению выгорания:

$$\chi = 1 - \exp\left[-6.908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]. \quad (2.39)$$

Основные коэффициенты термодинамического расчета приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Коэффициенты термодинамического расчета:

п, мин-1	$\delta$	$\Psi$	$\xi$	qz, кДж/кг	E2, МПа	$\varphi_z$ , град, ПКВ	m
900	1	0,92	0,92	2454,616	59,88841	35	2,5
1500	1	0,94	0,94	2180,775	50,93971	45	2,6
2600	1	0,95	0,95	2207,782	50,37929	48	2,7
5000	1	0,96	0,96	2231,183	47,5213	55	2,8
5600	1	0,97	0,97	2149,469	42,31184	62	2,9
Двигатель ВАЗ-2112							
900	0,9435	0,81	0,764277	2095,696	43,98798	40	3,1
2600	1	0,86	0,86	2284,733	46,40438	48	3,2
3700	1	0,96	0,96	2556,549	50,28953	55	3,3
5000	1	0,97	0,97	2592,875	50,44589	58	3,4
5600	1	0,99	0,99	2646,799	49,49647	62	3,5

Расчёт текущих параметров процесса сгорания проводится с определённым шагом –  $1^0$  ПКВ, а значения указанных параметров приводятся Приложении В.

## 2.7 Расчет процессов расширения и выпуска

Степень последующего расширения при  $V_z$

$$\delta = V_a / V_z \quad (2.40)$$

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

$$n_2 = 1 + \frac{8.314}{23.7 + 0.0046 \left( \frac{1}{\delta^{n_1-1}} + 1 \right) \cdot T_z} ; \quad (2.41)$$

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \text{МПа}; \quad (2.42)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \text{ К}; \quad (2.43)$$

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры газов от конца процесса сгорания до  $540^\circ$  поворота коленчатого вала находятся из соотношений

$$V_{PT} = \frac{V_a}{\varepsilon} \left[ 1 + \frac{\varepsilon - 1}{1} \cdot \left( \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[ \cos \varphi_{PT} \right] + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi_{PT}} \right) \right], \quad (2.44)$$

где  $\varphi_{PT}$  – текущее значение поворота коленчатого вала

$$P_{PT} = P_b \cdot \left( \frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2}; \quad T_{PT} = T_b \left( \frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2-1} \quad (2.45)$$

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{P_b/P_r}} \quad \text{К} \quad (2.46)$$

погрешность расчёта  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{100 \cdot (T_r - T'_r)}{T_r} \quad \% . \quad (2.47)$$

Результаты расчета процесса расширения и выпуска приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Расчет процесса расширения и выпуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_z, \text{м}^3$	$T_z, \text{К}$	$P_z, \text{МПа}$	$\delta$	$n_2$	$P_b, \text{МПа}$	$T_b, \text{К}$	$T_r, \text{К}$	$\Delta, \%$
900	0,1178	3357,56	7,925	8,687	1,168	0,6349	2337,02	1290,866	0,8489
1500	0,1442	3156,08	6,048	7,273	1,173	0,5907	2241,572	1276,149	2,915
2600	0,1498	3150,69	5,808	7,073	1,173	0,5859	2248,466	1299,048	3,923
5000	0,1763	3082,31	4,831	6,317	1,174	0,5553	2238,257	1328,065	4,08
5600	0,1894	3142,67	4,615	5,965	1,171	0,5701	2315,608	1369,725	3,767
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0,1494	2639,83	5,121	6,688	1,188	0,5354	1846,58	1086,178	0,572
2600	0,1684	2756,27	4,714	6,139	1,1835	0,5504	1975,7	1162,08	0,093
3700	0,1951	2913,76	4,303	5,474	1,1775	0,5815	2155,05	1244,545	-0,036
5000	0,1972	2929,05	4,279	5,474	1,1767	0,5789	2168,77	1265,439	0,0347
5600	0,2052	2976,31	4,179	5,474	1,175	0,5669	2209,79	1309,556	0,349

Ошибка определения температуры остаточных газов не превышает 5 %.

## 2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла

Теоретическая индикаторная работа цикла определяют по методу трапеций;

$$L_{iT} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{1i} + P_{2i}}{2} |V_{2i} - V_{1i}|; \quad (2.48)$$

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{\varepsilon - 1 \cdot \bar{V}_a}, \quad \text{МПа} . \quad (2.49)$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8.314 \frac{M_1 \cdot P_{iT} \cdot T_0}{P_0 \cdot \eta_v \cdot H_u} . \quad (2.50)$$

Удельный индикаторный расход топлива

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 10^3, \quad \text{г/кВт} \cdot \text{ч} . \quad (2.51)$$

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Индикаторные показатели рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$L_i, \text{кДж}$	$P_i, \text{Мпа}$	$N_i, \text{кВт}$	$\eta_i$	$g_i, \text{г/кВт*ч}$
900	0,9258707	0,903418	10,23873	0,42375	193,3912
1500	0,9505903	0,884107	23,57619	0,423998	193,2782
2600	1,0680231	1,002157	46,76735	0,452917	198,4646
5000	1,0967292	0,951718	71,06159	0,433076	173,2271
5600	1,1186531	0,912496	75,43298	0,427829	171,504
Двигатель ВАЗ-2112					
900	1,0012	1,1060343	12,442886	0,4089854	191,03093
2600	1,09	1,1651984	37,868947	0,405874	186,00051
3700	1,1957	1,2379594	57,255621	0,4184105	182,75552
5000	1,224	1,2533459	78,334121	0,4013589	170,24613
5600	1,2406	1,2210353	85,47247	0,3929888	166,22992

## 2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя

Давление механических потерь при  $S/D = 71/82 = 0.865$ , если средняя скорость поршня:  $v_n = \frac{Sn}{30}$ , м/с

Среднее давление механических потерь

$$P_M = 0.034 + 0.0113v \quad , \text{МПа} . \quad (2.52)$$

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_{iT} - P_M, \text{МПа} . \quad (2.53)$$

Механический К.П.Д.

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{iT}} . \quad (2.54)$$

Эффективный К.П.Д.

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M \cdot \quad (2.55)$$

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \quad (2.56)$$

Эффективная мощность

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_L \cdot n}{30\tau}, \text{ кВт} \cdot \quad (2.57)$$

Часовой расход топлива

$$G_T = N_e \cdot g_e, \text{ кг/ч} \cdot \quad (2.58)$$

Крутящий момент

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.59)$$

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Эффективные показатели двигателя

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{п.ср}$ , м/с	$p_m$ , Мпа	$p_e$ , Мпа	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e$ , г/(кВт.ч)	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н.м	$G_T$ , кг/ч
900	2,13	0,0671	1,137471	0,94428	0,2091	775,87382	18,796	131,4	9,9285
1500	3,55	0,08586	1,086743	0,9267	0,1871	850,99001	28,5	137,6	17,34
2600	6,153	0,120224	1,046046	0,8969	0,1724	893,47589	46,2	147,07	30,375
3500	8,283	0,14834	1,011531	0,8721	0,162	893,001	59,2	145,2	39,6
5000	11,833	0,1952	0,96807	0,8322	0,1729	826,49322	74,5	130	50,006
5600	13,253	0,213944	0,930146	0,813	0,1769	789,43744	80,3	119,8	51,401
Двигатель ВАЗ-2112									
900	2,13	0,0671	1,0389	0,9393	0,4029	273,3719	11,68	106,3	3,377
2600	6,153	0,1202	1,0449	0,8968	0,3951	257	36,8	128,6	9,6
3500	8,756	0,1546	1,0834	0,8751	0,3924	258,8332	50,11	127,5	12,464
5000	11,833	0,1952	1,0581	0,8442	0,4064	261,652	66,13	114,7	16,3
5600	13,253	0,2139	1,0071	0,8248	0,4066	268,6	70,49	105,3	17,208

## 2.10 Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом:

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{20957,1 \cdot G_T}{3.6} = 5203 \cdot G_T \quad (2.60)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000 N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100 / Q_o \quad (2.61)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{c_i D^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u}, \quad (2.62)$$

$$q_B = Q_B * 100 / Q_o; \quad (2.63)$$

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left( \frac{G_T}{3.6} \right) M_2 \left[ m c_V \bar{t}_r + 8.315 \bar{t}_r \right] - M_1 \left[ m c_V \bar{t}_o + 8.315 \bar{t}_o \right], \quad (2.64)$$

$$q_r = Q_r * 100 / Q_0 \quad (2.65)$$

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива отсутствует, так как на всех режимах поддерживается стехиометрический состав топливовоздушной смеси.

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3,6 \quad (2.66)$$

$$q_{н.с} = Q_{н.с} * 100 / Q_0 \quad (2.67)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_v + Q_r + Q_{н.с}) , \quad (2.68)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100 / Q_0 \quad (2.69)$$

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 - Тепловой баланс разрабатываемого двигателя

n, мин <sup>-1</sup>	G <sub>T</sub> , кг/ч	Q <sub>0</sub> , Дж/с	Q <sub>e</sub> , Дж/с	q <sub>e</sub> , %	Q <sub>v</sub> , Дж/с	q <sub>v</sub> , %	Q <sub>r</sub> , Дж/с	q <sub>r</sub> , %	Q <sub>н.с.</sub> , Дж/с	q <sub>н.с.</sub> , %	Q <sub>ост.</sub> , Дж/с	q <sub>ост.</sub> , %
900	1,980	23363	8432	36,1	6352	27,2	6080	26,0	0	0	1181	5,1
1500	4,556	42977	16556	38,5	12405	28,9	12509	29,1	0	0	1508	3,5
2600	9,281	60525	22048	36,4	18022	29,8	18004	29,7	0	0	2450	4,0
5000	12,31	107949	33381	30,9	34522	32,0	35201	32,6	0	0	4845	4,5
5600	12,93	115752	33212	28,7	35804	30,9	36961	31,9	0	0	6514	5,6

### 3 Кинематический расчет

Премещение поршня. [2].

$$S_x = R \left[ \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right] \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Угловая скорость вращения коленчатого вала

$$\omega = \pi n / 30 = 3,14 \cdot 5600 / 30 = 586 \text{ рад/с.}$$

Скорость поршня

$$v_{II} = \omega R \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с.} \quad (3.2)$$

Ускорение поршня

$$j = \omega^2 R \left[ \cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi \right] \text{ м/с}^2. \quad (3.3)$$

Максимальное значение ускорения поршня достигается при  $\varphi=0^\circ$ ;

$$j_{\max} = \omega^2 R \left[ 1 + \lambda \right] = 586^2 \cdot 35,5 \left[ 1 + 0,289 \right] = 15767 \text{ м/с}^2.$$

Расчет производится аналитически через каждые  $10^\circ$  угла поворота коленчатого вала. Расчитанные значения перемещения, скорости и ускорения поршня представлены в приложении, а график представлен на плакате.

## 4 Динамический расчет

### 4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма [1]

С учетом диаметра цилиндра, отношения  $S/D$ , рядного расположения цилиндров и достаточно высокого значения  $p_z$  устанавливаются:

- масса поршневой группы

$$m_n = m'_n \cdot F_n = 75 \cdot 0,00535 = 0,316 \text{ кг}; \quad (4.1)$$

- масса шатуна

$$m_{ш} = m'_{ш} \cdot F_n = 109,6 \cdot 0,00535 = 0,624 \text{ кг}; \quad (4.2)$$

- масса неуравновешанных частей одного колена вала без противовесов

$$m_k = m'_k \cdot F_n = 150 \cdot 0,00535 = 0,805 \text{ кг}. \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{ш.п} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,624 = 0,165 \text{ кг}. \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа:

$$m_{ш.к} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,624 = 0,473 \text{ кг}. \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_n + m_{ш.п} = 0,316 + 0,165 = 0,481 \text{ кг}. \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение:

$$m_r = m_k + m_{ш.к} = 0,805 + 0,473 = 1,278 \text{ кг}. \quad (4.7)$$

## 4.2 Удельные и полные силы инерции

Сила инерции возвратно-поступательного движения масс

$$p_j = -jm_j/F_n = -j0,481 \cdot 10^{-6}/0,00535 = -j141 \cdot 10^{-6} \text{ МПа.} \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс

$$K_R = -m_R R \omega^2 = -1,278 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -28,02 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна

$$K_{Ru} = -m_{u.k} R \omega^2 = -0,473 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -8,7 \text{ кН.} \quad (4.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{Rk} = -m_{k.k} R \omega^2 = -0,805 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -19,32 \text{ кН.} \quad (4.11)$$

## 4.3 Удельные суммарные силы

Удельная сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$p = \Delta p_z + p_j \text{ (МПа).} \quad (4.12)$$

Удельная нормальная сила:

$$p_N = p \cdot \operatorname{tg} \beta \text{ (МПа).} \quad (4.12)$$

Удельная сила, действующая вдоль шатуна:

$$p_s = p(1/\cos \beta) \text{ (МПа).} \quad (4.13)$$

Удельная сила, действующая по радиусу кривошипа

$$p_k = p \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \text{ (МПа)}. \quad (4.14)$$

Удельная и полная тангенциальные силы

$$p_T = p \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta \text{ (МПа)} \quad (4.15)$$

$$T = p_T \cdot 0,004776 \cdot 10^3 \quad (4.16)$$

Расчетные значения представлены в таблице 4.2.

Среднее значение тангенциальной силы за цикл:

$$T_{cp} = \frac{2 \cdot 10^6}{\pi \tau} p_i F_{II} = \frac{2 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 4} \cdot 1,2486 \cdot 0,00535 = 1063 \text{ Н}; \quad (4.17)$$

$$p_{T_{cp}} = \frac{\Sigma F_1 - \Sigma F_2}{OB} Mp = \frac{1991 \cdot 1170}{240} \cdot 0,05 = 0,196 \text{ МПа}; \quad (4.18)$$

по данным расчета по площади, заключенной между кривой  $p_T$  и осью абсцисс  
ошибка  $\Delta = (1063 - 1049)100/1063 = 1,31\%$

$$T_{cp} = p_{T_{cp}} F_{II} = 0,196 \cdot 0,00535 \cdot 10^6 = 1049 \text{ Н}; \quad (4.19)$$

#### 4.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = TR = T \cdot 0,0374 \cdot 10^3 \text{ Нм} \quad (4.20)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками

$$\Theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ \quad (4.21)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ср} = M_i = M_e / \eta_m = 143,8 / 0,9052 = 158,8 \text{ Нм} \quad (4.22)$$

- по площади, заключенной под кривой  $M_{кр}$

$$M_{кр.ср} = \frac{F_1 - F_2}{OA} M_m = \frac{1470 - 615}{60} 10 = 160,5 \text{ Нм} \quad (4.23)$$

- ошибка  $\Delta = (158,8 - 160,5) 100 / 158,8 = 1,07\%$ .

Максимальный и минимальный крутящие моменты

$$M_{кр \max} = 570 \text{ Нм};$$

$$M_{кр \min} = 277 \text{ Нм}$$

#### 4.5 Силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала

Для проведения расчета результирующей силы, действующей на шатунную шейку рядного двигателя, составляют таблицу 4.3, в которую из таблицы 4.2 переносят значения силы  $T$ .

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа:

$$P_k = K + K_{RШ} = K + p_k F_{II} \text{ Н.} \quad (4.24)$$

Результирующая сила  $R_{Ш}$ , действующая на шатунную шейку, подсчитывается графическим сложением векторов сил  $T$  и  $P_k$  при построении полярной диаграммы. Масштаб сил на полярной диаграмме для суммарных сил  $M_p = 0,1 \text{ кН в мм}$ . Значения  $R_{Ш}$  для различных  $\varphi$  заносят в таблицу 4.3 и по ним строят диаграмму  $R_{Ш}$  в прямоугольных координатах.

По развернутой диаграмме  $R_{Ш}$  определяют

$$R_{Ш \max} = 17,31 \text{ кН}; \quad R_{Ш \min} = 0,577 \text{ кН}$$

$$R_{Ш.ср} = FM_p / OB = 28425 \cdot 0,1 / 240 = 10,66 \text{ кН};$$

где  $OB$  – длина диаграммы, мм;  $F$  – площадь под кривой  $R_{шш}$ , мм<sup>2</sup>.

По полярной диаграмме строят диаграмму износа шатунной шейки. По диаграмме износа определяют расположение оси масляного отверстия.

#### 4.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа:

$$K_{pK} = P_K + K_{RK} = P_K - 8,960 \text{ кН.} \quad (4.25)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала,

$$R_k = \sqrt{(PT_k \cdot 10^3 \cdot F_n)^2 + (K_{P_k})^2} \quad (4.26)$$

#### 4.7 Силы, действующие на коренные шейки

Сила, действующая на первую коренную шейку:

$$R_{к.ш1} = -0,5R_{к1}. \quad (4.27)$$

Изменение силы  $R_{к.ш1}$  в зависимости от  $\varphi$  показывает полярная диаграмма  $R_k$ , но повернутая на  $180^\circ$ .

Сила, действующая на вторую коренную шейку:

$$R_{к.ш2} = \sqrt{T_{к2}^2 + K_{к2}^2}, \quad (4.28)$$

где  $T_{к2} = -0,5(T_1 - T_2)$ ;  $K_{к2} = -0,5(K_{pk1} - K_{pk2})$ .

Расчет силы  $R_{к.ш2}$  приведен в таблице приложения В.

Сила, действующая на третью коренную шейку:

$$R_{к.ш3} = \sqrt{T_{к3}^2 + K_{к3}^2}, \quad (4.29)$$

где  $T_{к3} = 0,5(T_2 + T_3)$ ;  $K_{к3} = 0,5(K_{рк2} + K_{рк3})$ .

Расчетные силы приведены в таблице приложения Г.

Нагрузки на 4-ю и 5-ю коренные шейки в соответствии с порядком работы двигателя и расположением кривошипов равны нагрузкам, действующим на 2-ю и 1-ю шейки, но смещены на  $360^0$ .

## 5 Расчет основных деталей двигателя

### 5.1 Расчет поршневой группы

#### 5.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня.[5].

$$\sigma_{из} = p_{ZД}(r_i/\delta)^2 = 7,659 \cdot (31,75/6,5)^2 = 182,2 \text{ МПа}, \quad (5.1)$$

где  $r_i = D/2 - (s+t+\Delta t) = 82,5/2 - (5-3,9-0,6) = 31,75 \text{ мм}$ .

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении x – x

$$\sigma_{сжс} = P_{ZД}/F_{x-x} = 0,0409/0,00103 = 39,9 \text{ МПа}, \quad (5.2)$$

где  $P_{ZД} = p_{ZД} \cdot F_{П} = 7,659 \cdot 53,45 \cdot 10^{-4} = 0,0409 \text{ МН}$ ;

$$F_{x-x} = (\pi/4)(d_k^2 - d_i^2) - n \cdot F^{\wedge} = [(3,14/4)(73,5^2 - 63,5^2) - 10 \cdot 5] \cdot 10^{-6} = 0,00103 \text{ м}^2;$$

$$d_k = D - 2(t+\Delta t) = 82,5 - 2(3,9 - 5) = 73,5 \text{ мм};$$

$$F^{\wedge} = (d_k - d_i) \cdot d_M/2 = (73,5 - 63,5) \cdot 1/2 = 5 \text{ мм}^2.$$

Напряжение разрыва в сечении x – x:

$$\omega_{x,x \max} = \pi n_{x,x \max}/30 = 3,14 \cdot 7500/30 = 785 \text{ рад/с}; \quad (5.3)$$

- масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения x – x:

$$m_{x-x} = 0,5m_n = 0,5 \cdot 0,316 = 0,158 \text{ кг}; \quad (5.4)$$

- максимальная разрывающая сила

$$P_j = m_{x-x} R \omega_{x,x \max}^2 (1+\lambda) = 0,158 \cdot 0,0374 \cdot 785^2 (1+0,289) = 0,0045 \text{ МН}; \quad (5.5)$$

Напряжение разрыва

$$\sigma_p = P_j / F_{x-x} = 0,0045 / 0,00103 = 4,4 \text{ МПа.} \quad (5.6)$$

Напряжение в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z\text{д}} D / h_{\text{п}} = 0,0314 \cdot 7,659 \cdot 82,5 / 3,7 = 5,4 \text{ МПа;} \quad (5.7)$$

- изгиба

$$\sigma_{\text{из}} = 0,0045 p_{z\text{д}} (D / h_{\text{п}})^2 = 0,0045 \cdot 7,659 \cdot (82,5 / 3,7)^2 = 17,1 \text{ МПа;} \quad (5.8)$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{из}}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{17,1^2 + 4 \cdot 5,4^2} = 20,2 \text{ МПа.} \quad (5.9)$$

- удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\text{max}} / (h_{\text{ю}} D) = 0,0079 / (31,3 \cdot 82,5) \cdot 10^{-3} = 3,059 \text{ МПа;} \quad (5.10)$$

$$q_2 = N_{\text{max}} / (H D) = 0,0079 / (50,3 \cdot 82,5) \cdot 10^{-3} = 1,904 \text{ МПа.} \quad (5.11)$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,57 = 81,43 \text{ мм;} \quad (5.12)$$

$$D_{\text{Ю}} = D - \Delta_{\text{Ю}} = 82 - 0,165 = 81,835 \text{ мм,} \quad (5.13)$$

где  $\Delta_{\Gamma} = 0,007D = 0,007 \cdot 82 = 0,57 \text{ мм;}$   $\Delta_{\text{Ю}} = 0,002D = 0,002 \cdot 82 = 0,165 \text{ мм.}$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{з}} &= D[1 + \alpha_{\text{ч}}(T_{\text{ч}} - T_0)] - D_{\text{з}}[1 + \alpha_{\text{н}}(T_{\text{н}} - T_0)] = \\ &= 82,5[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 81,93[1 + 22 \cdot 10^{-6}(593 - 293)] = 0,118 \text{ мм;} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\Delta_{ю} = D[1 + \alpha_{ц}(T_{ю} - T_0)] - D_{ю}1 + \alpha_{н}(T_{ю} - T_0) = \quad (5.15)$$

$$= 82,5[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 82,335 [1 + 22 \cdot 10^{-6}(413 - 293)] = 0,056 \text{ мм},$$

где  $T_{ц}=383 \text{ К}$ ,  $T_{Г}=593 \text{ К}$ ,  $T_{ю}=413 \text{ К}$ ,  $T_0=293 \text{ К}$  температуры стенок цилиндра, головки и юбки поршня в рабочем состоянии и начальная температура приняты с учетом водяного охлаждения двигателя.

### 5.1.2 Расчет поршневого кольца

Необходимые данные приведены в п. 5.1.1. Материал кольца – серый чугун,  $E=1,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{cp} = 0,152 E \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 (D/t)} = 0,152 \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot \frac{11,7/3,9}{(82,5/3,9 - 1)^3 (82,5/3,9)} = 0,265 \text{ МПа}, \quad (5.16)$$

где  $A_0 = 3t = 3 \cdot 3,9 = 11,7 \text{ мм}$ .

Давление (МПа) кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} \mu_{к} \quad (5.17)$$

Значения  $\mu_{к}$  для различных углов  $\psi$ , а также результаты расчета  $p$  приведены ниже.

Таблица 5.1 - Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности:

$\psi$ , град.	0	30	60	90	120	150	180
$\mu_{к}$	1,05	1,05	1,14	0,90	0,45	0,67	2,85
$p$ , МПа	0,277	0,277	0,3	0,237	0,118	0,176	0,75

### Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

$$\sigma_{из1} = 2,61 p_{cp} (D/t - 1)^2 = 2,61 \cdot 0,265 (82,5/3,9 - 1)^2 = 279 \text{ МПа.} \quad (5.18)$$

$$\sigma_{из2} = \frac{4E(1 - 0,114 A_0/t)}{m(D/t - 1,4)(D/t)} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^5 (1 - 0,114 \cdot 11,7/3,9)}{1,57(82,5/3,9 - 1,4)(82,5/3,9)} = 401 \text{ МПа.} \quad (5.19)$$

### Напряжение изгиба при давлении кольца на поршень

#### Монтажный зазор в рамке поршневого кольца

$$\begin{aligned} \Delta_k &= \Delta'_k + \pi D [\alpha_k (T_k - T_0) - \alpha_{ц} (T_{ц} - T_0)] = . \quad (5.20) \\ &= 0,08 + 3,14 \cdot 82,5 [11 \cdot 10^{-6} (493 - 293) - 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] = 0,414 \text{ мм,} \end{aligned}$$

где  $\Delta'_k$  – минимально допустимый зазор замке кольца во время работы двигателя (при расчете принимается  $\Delta'_k = 0,08$  мм),  $T_k = 493$  К,  $T_{ц} = 383$  К,  $T_0 = 293$  К температура кольца, стенок цилиндра в рабочем состоянии и начальная температура приняты с учетом водяного охлаждения двигателя.

### 5.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{z \max} = p_{z \max} F_n = 9,1489 \cdot 53,45 \cdot 10^4 = 0,0409 \text{ МН; .} \quad (5.21)$$

- инерционная

$$\begin{aligned} P_j &= - m_n \omega_m^2 R (1 + \lambda) \cdot 10^{-6} = \quad (5.22) \\ &= - 0,316 \cdot 691^2 \cdot 0,0374 (1 + 0,289) \cdot 10^{-6} = - 0,00703 \text{ МН,} \end{aligned}$$

где  $\omega_m = \pi n_m / 30 = 3,14 \cdot 6600 / 30 = 691$  рад/с;

- расчетная

$$P = P_{z \max} + k P_j = 0,0409 - 0,82 \cdot 0,00703 = 0,0352 \text{ МН. .} \quad (5.23)$$

где  $k = 0,82$  – коэффициент, учитывающий массу поршневого пальца.

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки шатуна

$$q_{uu} = P/d_n l_{uu} = 0,0352/0,022 \cdot 0,028 = 68,1 \text{ МПа.} \quad (5.24)$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_{\sigma} = P/d_n (l_n - b) = 0,0352/0,022 (0,028 - 0,032) = 53,3 \text{ МПа.} \quad (5.25)$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{из} = \frac{P(l_n + 2b - 1,5l_{uu})}{1,2(1 - \alpha^4)d_n^3} = \frac{0,0352(0,068 + 2 \cdot 0,032 - 1,5 \cdot 0,028)}{1,2(1 - 0,682^4)0,022^3} = 262,5 \text{ МПа,} \quad (5.26)$$

где  $\alpha = d_g/d_n = 15/22 = 0,682$ .

Касательная напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = \frac{0,85P(1 + \alpha + \alpha^2)}{(1 - \alpha^4)d_n^2} = \frac{0,85 \cdot 0,0352(1 + 0,682 + 0,682^2)}{(1 - 0,682^4) \cdot 0,022^2} = 132 \text{ МПа.} \quad (5.27)$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации:

$$\Delta d_{n \max} = \frac{1,35P}{El_n} \left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 \left[ 1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{1,35 \cdot 0,0352}{2 \cdot 10^5 \cdot 0,068} \left( \frac{1 + 0,682}{1 - 0,682} \right)^3 \left[ 1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] \cdot 10^3 = 0,0159 \text{ мм}$$

Напряжение овализации на внешней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 1,  $\psi = 0^0$ )

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{15P}{l_n d_n} \left[ 0,19 \frac{(2 + \alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] \left[ 1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[ 0,19 \frac{(2 + 0,682)(1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} - \frac{1}{1 - 0,682} \right] \left[ 1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = 73 \text{ МПа} \quad (5.28)$$

- в вертикальной плоскости (точки 3,  $\psi=90^0$ )

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 90} &= -\frac{15P}{l_n d_n} \left[ 0,174 \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2} + \frac{0,636}{1-\alpha} \right] \left[ 1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[ 0,174 \frac{(2+0,682)(1+0,6862)}{(1-0,682)^2} + \frac{0,636}{1-0,682} \right] \left[ 1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = -92,6 \text{ МПа}\end{aligned}\quad . (5.29)$$

Напряжение оваллизации на внутренней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 2,  $\psi=0^0$ )

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 0} &= -\frac{15P}{l_n d_n} \left[ 0,19 \frac{(1+2\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \right] \left[ 1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[ 0,19 \frac{(1+2 \cdot 0,682)(1+0,6862)}{(1-0,682)^2 \cdot 0,682} + \frac{1}{1-0,682} \right] \left[ 1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = -147 \text{ МПа}\end{aligned}\quad . (5.30)$$

- в вертикальной плоскости (точки 4,  $\psi=90^0$ )

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 90} &= \frac{15P}{l_n d_n} \left[ 0,174 \frac{(1+2\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} \right] \left[ 1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] \\ &= \frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[ 0,174 \frac{(1+2 \cdot 0,682)(1+0,6862)}{(1-0,682)^2 \cdot 0,682} - \frac{0,636}{1-0,682} \right] \left[ 1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = 159 \text{ МПа}\end{aligned}\quad (5.31)$$

## 6 Сравнительный анализ спроектированного двигателя

Для сравнительного анализа основные показатели спроектированного двигателя и двигателя ВАЗ-2112 сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Сравнение расчетных эффективных и экономичных показателей базового и модернизированного двигателей.

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{п.ср}$ , м/с	$p_m$ , Мпа	$p_e$ , Мпа	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e$ , г/(кВт.ч)	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н.м	$G_t$ , кг/ч
900	2,13	0,0671	1,137471	0,94428	0,2091	775,87382	18,796	131,4	9,9285
1500	3,55	0,08586	1,086743	0,9267	0,1871	850,99001	28,5	137,6	17,34
2600	6,153	0,120224	1,046046	0,8969	0,1724	893,47589	46,2	147,07	30,375
3500	8,283	0,14834	1,011531	0,8721	0,162	893,001	59,2	145,2	39,6
5000	11,833	0,1952	0,96807	0,8322	0,1729	826,49322	74,5	130	50,006
5600	13,253	0,213944	0,930146	0,813	0,1769	789,43744	80,3	119,8	51,401
Базовый двигатель ВАЗ-2112									
900	2,13	0,0671	1,0389	0,9393	0,4029	273,3719	11,68	123,99	3,377
2600	6,153	0,1202	1,0449	0,8968	0,3951	263,7	33,96	124,72	9,043
3500	8,756	0,1546	1,0834	0,8751	0,3924	258,8332	50,11	129,3	12,464
5000	11,833	0,1952	1,0581	0,8442	0,4064	261,652	66,13	126,29	15,336
5600	13,253	0,2139	1,0071	0,8248	0,4066	268,6	70,49	120,19	17,208

### 6.1 Особенности применения спирта как моторное топливо

Спирт обладает целым рядом преимуществ по сравнению с нефтяным топливом, и только большая стоимость, малая теплопроводность, высокая гигроскопичность и повышенное содержание альдегидов препятствуют его массовому применению в качестве топлива для ДВС. А достоинства спирта следующие:

– Высокие антидетонационные свойства (октановое число – более 100). Введение этанола в бензин обеспечивает повышение октанового числа. Каждые 3% этанола в смеси с бензином обеспечивают повышение октанового числа горючего в среднем на 1 единицу. То есть спирт может быть использован в качестве высокооктановой добавки к топливу. Он повышает и детонационную

стойкость горючего, так как температура самовоспламенения чистого бензина составляет  $290^{\circ}\text{C}$ , а его смеси с этанолом –  $425^{\circ}\text{C}$ .

– Процесс испарения начинается во впускном трубопроводе и заканчивается в цилиндре при ходе сжатия, обеспечивая охлаждение деталей двигателя – поршней и клапанов – и более полное наполнение цилиндров свежим зарядом (компрессорный эффект с 5-процентным увеличением мощности).

– Надежное воспламенение от электрической искры при значительных изменениях состава горючей смеси (диапазон воспламеняемости по коэффициенту избытка воздуха для спирта составляет примерно  $0,4\dots 1,7$ ).

– КПД двигателя, работающего на чистом спирте, выше, чем при использовании бензина.

– Меньшая токсичность отработавших газов.

Теплотворностью топлива называется количество тепла, выделяемое при сгорании одного килограмма его. Теплотворность измеряется в килокалориях на 1 кг топлива. Килокалория равна количеству тепла, необходимого для нагревания одного килограмма воды на  $1^{\circ}$ . Теплотворность различных топлив составляет:

– бензина  $10\,200\text{—}11\,000$  ккал/кг,

– бензола  $9700\text{—}10\,000$  ккал/кг,

– спирта  $6000\text{—}6400$  ккал/кг, чем меньше теплотворность топлива, тем больше его необходимо израсходовать для получения требуемой мощности.

Спирт в качестве топлива для двигателей мотоциклов можно применять древесный (метиловый) и винный (этиловый). Спирт позволяет повысить мощность двигателя как за счет повышения степени сжатия, так и за счет увеличения наполнения двигателя горючей смесью. Наиболее часто спирт применяют не в чистом виде, а в смеси с бензином и бензолом в соотношении по  $1/3$  каждого компонента. Такая смесь хорошо испаряется, способствует лучшему и устойчивому растворению каждой составляющей.

При применении спирта следует учитывать его большую способность поглощать воду (гигроскопичность). Спирт с примесью воды плохо растворяется, смесь расслаивается, т. е. получается неоднородной, что нарушает нормальную работу двигателя.

Большой расход спиртовых смесей вызывает необходимость увеличения пропускной способности жиклеров. Качество топлива обычно проверяется по основным показателям в лаборатории на заводе или на нефтебазе, после чего на этот сорт топлива выдается специальный паспорт. В том случае, когда неизвестно когда и откуда получено топливо, некоторые его качества проверяют и более простым способом.

#### Этанол и бензино-этанольные топлива

Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с метиловым спиртом, этанол используется в качестве моторного топлива в значительно больших объемах чем метанол. Это обстоятельство обусловлено такими преимуществами этанола:

- более высокая теплотворная способность - на 35% выше таковой для метанола;
- лучшая растворимость в бензине;
- меньшая коррозионная агрессивность по отношению к резинотехническим изделиям и металлам;
- значительно меньшая токсичность;
- бензины, содержащие этанол, характеризуются лучшими антидетонационными свойствами.

Генри Форд был первым, кто начал использовать этанола в качестве моторного топлива, который в 1880 г. создал первый автомобиль, работавший на этаноле. В 1902 г. на конкурсе в Париже были выставлены более 70 карбюраторных двигателей, работающих на этаноле и смесях этанола с бензином.

Однако широкое применение этанола в качестве горючего началось в 70-х и особенно в 80 — 90-е гг. прошлого столетия, что было обусловлено нефтяными кризисами.

Этанол получают такими способами:

- методом прямой или сернокислотной гидратации этилена – синтетический этанол;
- гидролизом непищевого растительного сырья - гидролизный этанол;
- ферментативной переработкой пищевого растительного сырья - пищевой этанол.

При производстве этанола методом прямой гидратации этилена используются фосфорнокислотные катализаторы на твердом носителе; процесс протекает при температуре 260 — 280 °С и давлении 7 — 8 МПа.

Сбраживанием продуктов гидролиза древесины получают гидролизный этанол. Необходимые для сбраживания сахара получают гидролизом древесного сырья - опилки, щепы и другие отходы деревообработки. Целлюлозу, содержащую полисахариды, обрабатывают 0,5%-ным раствором серной кислоты при 180 °С и 1 - 1,5 МПа, что приводит к образованию глюкозы, которую затем подвергают спиртовому брожению.

При получении этанола из пищевого сырья используются такие растительные продукты, как зерно, картофель, сахарный тростник, кукуруза и др., содержащие крахмал или углеводы. Сущность метода заключается в сбраживании этих продуктов при помощи бактерий, перерабатывающих углеводы в этанол.

Синтетический этанол является наиболее дешевым продуктом по сравнению с этиловым спиртом, полученным другими процессами.

Чистый этанол используется в качестве моторного топлива в сравнительно небольших объемах, широко применяются различные смеси бензина с этанолом.

Наиболее широко этанол в качестве моторного топлива используется в Бразилии. Более 90% автомобилей в Бразилии используют моторное топливо, содержащее этанол.

Новая топливная система – FFV (flexible fuel vehicle - автомобиль с гибкой топливной системой) использует бензино-этанольное топливо Е 85 (85% этанола и 15% бензина). Автомобили с FFV обладают такими характеристиками:

- они имеют единый топливный бак для любого вида горючего и систему автоматической перенастройки и поддержания необходимого соотношения топливо-воздух в зависимости от состава топлива;

- резинотехнические изделия являются устойчивыми по отношению к спирту и бензину;

- хорошие энергетические характеристики;

- используют каталитические нейтрализаторы отработавших газов.

Трансатлантический концерн “General Motors” в 1993 г. выпустил 320 автомобилей Chevrolet Lumina Variable Fuel Vehicles (VFS).

В 1994 г. компания Ford построила несколько автомобилей, использующих топливо Е 85, Taurus FFV.

В 2002 г. компания Daimler Chrysler продала миллионный автомобиль, использующий в качестве топлива Е 85.

Исследования, проведенные в Канаде, показали, что использование топлива Е 85 позволяет снизить выбросы газов, вызывающих парниковый эффект, на 37% (для Е 10 только на 4%). Содержание токсичных веществ в отработавших газах снижается: оксида углерода на 25 – 39%, оксидов азота на 30%, канцерогенных ароматических углеводородов на 50%, летучих органических соединений на 30%.

## 7 Безопасность и экологичность проекта

### 7.1 Пожарная безопасность автомобиля

Для оценки опасности возгорания автомобилей, следует также проанализировать их пожарную нагрузку. Она представляет собой совокупность горючих материалов, из которых изготовлены отдельные узлы и детали автомобиля, а также горючие материалы, которые применяются в нем как эксплуатационные. Пожарная опасность этих материалов, как сказано выше, характеризуется по ГОСТ 12.1.044-89 [10]. При любых пожарно-технических исследованиях необходимо учитывать способность этих материалов и веществ воспламеняться, образовывать взрывоопасные концентрации, взрываться и гореть от источника зажигания, при взаимодействии с другими веществами, окислителями и т.д.

Следует отметить, что в автомобиле горючая нагрузка распределена не равномерно. В моторном отсеке легкового автомобиля горючую нагрузку составляют различные детали систем двигателя. Как следует из практики исследования пожаров, в автомобилях различных марок для этих целей используются одни и те же материалы.

В топливной системе, помимо топлива, горючую нагрузку составляют гибкие резиновые топливопроводы и материал воздушного фильтра. В большинстве автомобилей гибкие топливопроводы изготовлены из армированной хлопчатобумажными нитками резины. В качестве топлива используется бензин, дизельное топливо, газ. Топливная система автомобиля изолирована по отношению к окружающей среде. Поэтому топливо может образовать взрывоопасную и горючую среду в моторном отсеке только в случае ее разгерметизации. Опыт исследования пожаров в автомобилях свидетельствует о том, что места нарушения герметичности, а также механизм этого процесса и его причины могут быть самыми разнообразными [11]. Как правило, это зависит от конструктивных особенностей системы, качества ее деталей и их монтажа. Места соединений деталей топливной системы герметизируются с помощью уплотнитель-

ных хомутов. В ряде случаев в автомобилях такие хомуты отсутствуют, что может привести к разгерметизации топливной системы и выходу топлива в объем моторного отсека. Наиболее опасным является случай разгерметизации топливопроводов, находящихся под избыточным давлением [12,13,14].

Особо следует отметить автомобили, у которых бензонасос с электроприводом и находится в бензобаке автомобиля. Опасность такой схемы подачи топлива заключается в том, что даже при неработающем двигателе автомобиля, но при включенном зажигании бензонасос работает, и часть топливопроводов находится под давлением. В современных автомобилях, как отечественных, так и иномарках, в систему питания могут входить и другие детали, которые предназначены для более качественной очистки топлива, его экономии, улучшения качества смесеобразования и т.п.

В последнее время широкое распространение получили автомобили с инжекторной системой смесеобразования [12]. В инжекторных автомобилях требования к герметичности топливной системы более жесткие. Это обуславливается тем, что в топливопроводах системы питания, находящихся под избыточным давлением, величина этого давления превышает давление в топливопроводах карбюраторных двигателей. В этом случае, даже незначительная неплотность системы может привести к пожару.

Определенную долю в пожарную нагрузку моторного отсека автомобиля вносит и система охлаждения двигателя, причем это зависит от вида охлаждающей жидкости, используемой в ней. В современных двигателях в качестве охлаждающих жидкостей используются тосолы и антифризы на основе водных растворов этиленгликоля с набором присадок. Охлаждающие жидкости на основе этиленгликоля являются горючими жидкостями. При этом следует отметить, что пожарная опасность этих жидкостей зависит от их температуры, скорости вытекания и объема вытекшей жидкости. Разгерметизация системы охлаждения холодного двигателя (температура которого не превышает температуру окружающей среды) не приводит к образованию горючей смеси независимо от скорости вытекания жидкости и количества вылившейся жидкости.

При разгерметизации системы охлаждения прудетого или работающего двигателя горючая среда образоваться может. В этом случае возможность воспламенения горючих паров жидкости зависит от наличия источника зажигания, его параметров, количества и скорости поступления горючей жидкости, а также от наличия условий для образования паров соответствующей концентрации.

Не смотря на значительное количество факторов, влияющих на качество автопарка России и соответственно, как следствие такой высокой вероятности возникновения пожара в двигательном отсеке, вероятность возникновения пожара нового современного автомобиля также высока. В значительной степени этому способствует высокая энергонасыщенность, предельные температурные режимы работы двигателя, применение каталитических систем очистки выхлопных газов и даже воздуха [15], рабочие элементы которых нагреваются до высокой температуры, насыщенность современными электрическими системами, регулирующими работу двигателя и других систем автомобиля.

#### 7.1.1 Требования пожарной безопасности к системе питания

- Элементы системы питания должны надлежащим образом защищаться частями шасси или кузова от соприкосновения с возможными препятствиями на грунте. Эта защита не требуется, если элементы, находящиеся внизу транспортного средства, располагаются по отношению к грунту выше части шасси или кузова, расположенной перед ними.
- Система питания должна быть сконструирована, изготовлена и установлена таким образом, чтобы ее элементы могли противостоять явлениям коррозии изнутри и снаружи.
- Топливопроводы, а также любые другие части системы питания должны размещаться на транспортном средстве по мере возможности в защищенных местах. Явления скручивания и изгиба, а также вибрация каркаса транспортного средства или двигателя не должны вызывать трения, сжатия или других ненормальных воздействий на элементы системы питания.

- Соединения мягких и гибких трубопроводов с жесткими частями элементов системы питания должны быть сконструированы и выполнены таким образом, чтобы сохранялась их герметичность в различных условиях использования транспортного средства, несмотря на явления скручивания или изгиба, а также на вибрацию каркаса транспортного средства или двигателя.
- Топливный(е) бак(и) должен(ны) изготавливаться из огнеупорного металлического материала. Он (они) может (могут) изготавливаться из пластмассы при условии соответствия требованиям, изложенным в Приложение 5.
- Топливный(е) бак(и) не должен(ны) располагаться в салоне или составлять какую-либо из его перегородок.
- Для отделения салона от топливного(ых) бака(ов) должна предусматриваться перегородка. Она должна выдерживать в течение 2 мин воздействие свободного пламени горящего бензина, если она помещена горизонтально в 20 см над уровнем жидкости. Перегородка может иметь соответствующие отверстия (например, для пропуска проводов) при условии, что они устроены таким образом, чтобы топливо не могло свободно вытекать в салон.
- Топливный бак должен быть прочно укреплен и установлен таким образом, чтобы обеспечивался вывод из транспортного средства на землю топлива, которое может вытечь из бака, его наливной горловины и соединений.
- Бак и связанное с ним вспомогательное оборудование должны быть изготовлены и установлены таким образом, чтобы они не могли заряжаться статическим электричеством от транспортного средства.
- Наливная горловина не должна находиться ни в салоне, ни в багажнике, ни в моторном отсеке.
- Если наливная горловина расположена на боковой стороне транспортного средства, то пробка в закрытом положении не должна выступать над прилегающей поверхностью кузова.

- Топливо, которое может пролиться при наполнении топливного(ых) бака(ов), не должно попадать на систему выхлопа. Оно должно отводиться на грунт.

#### 7.1.2 Требования пожарной безопасности к электрооборудованию

- Электрические провода должны крепиться к корпусу или к стенкам транспортного средства, вблизи которых они проходят, за исключением проводов, расположенных внутри полых элементов. В местах прохождения через стенки провода должны быть в достаточной мере защищены от повреждения изоляции.
- Электрооборудование должно быть сконструировано, изготовлено и установлено таким образом, чтобы его элементы могли противостоять явлениям коррозии.

#### 7.2 Нормы по ограничению токсичности отработавших газов автотранспортных ДВС

В настоящее время Российская Федерация обладает необходимой правовой и нормативно-технической базой, предметом регулирования которой являются вопросы экологической безопасности, в том числе, в отношении двигателей внутреннего сгорания. Эта нормативно-правовая база включает документы общероссийской и международной юрисдикции.

В 1987 г. Россия стала полноправным участником Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН). Наличие такого международного статуса обязывает каждое государство соблюдать определённые правила ЕЭК ООН:

1. Правила ЕЭК ООН N 24 (24-03\*) "Единообразные предписания, касающиеся:

I. официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия в отношении выброса видимых загрязняющих веществ;

II. официального утверждения автотранспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, официально утвержденных по типу конструкции;

III. официального утверждения автотранспортных средств с двигателем с воспламенением от сжатия в отношении выброса видимых загрязняющих веществ;

IV. измерения полезной мощности двигателей с воспламенением от сжатия".

2. Правила ЕЭК ООН N 49 (49-02, 49-03, 49-04\*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выделяемых ими загрязняющих веществ".

3. Правила ЕЭК ООН N 83 (83-02, 83-03, 83-04, 83-05\*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выброса загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей".

4. Правила ЕЭК ООН N 96 (96-01\*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных тракторах и внедорожной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями".

В Правиле № 49 и N 96 ЕЭК ООН, введённом в действие в 1982 г., изложены основные требования, предъявляемые к отработавшим газам автотранспортных двигателей в отношении их токсичности. Позже были приняты дополнения (поправки) к Правилу № 49, получившие определённые условные наименования.

Особенности использования Правила № 49 ЕЭК ООН применительно к автотранспортной технике заключаются в том, что она (эта техника должна соответствовать только тем требованиям в части ограничения токсичности, которые действовали на момент её производства, то есть к такой технике не могут быть применены более жёсткие требования, вводимые в действие в последующих (относительно года выпуска) нормативно-правовых документах.

Таблица 7.1 - Требования по токсичности ОГ автотранспортных ДВС

**Стандарты Евросоюза по токсичности ОГ легких грузовых автомобилей, г/км**

Категория*	Нормы токсичности	Дата введения	CO	CH	CH+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Твердые частицы (сажа)
<b>Бензиновые</b>							
N <sub>1</sub> , Класс I, <1305 кг	Euro 1	окт. 1994	2,72	-	0,97	-	-
	Euro 2	январь 1998	2,2	-	0,50	-	-
	Euro 3	январь 2000	2,3	0,20	-	0,15	-
	Euro 4	январь 2005	1,0	0,1	-	0,08	-
	Euro 5	сентябрь 2009	1,0	0,10 <sup>*</sup>	-	0,06	0,005 <sup>*,A</sup>
	Euro 6	сентябрь 2014	1,0	0,10 <sup>*</sup>	-	0,06	0,005 <sup>*,A</sup>
N <sub>1</sub> , Класс II, 1305...1760 кг	Euro 1	окт. 1994	5,17	-	1,40	-	-
	Euro 2	январь 1998	4,0	-	0,65	-	-
	Euro 3	январь 2001	4,17	0,25	-	0,18	-
	Euro 4	январь 2006	1,81	0,13	-	0,10	-
	Euro 5	сентябрь 2010	1,81	0,13 <sup>**</sup>	-	0,075	0,005 <sup>*,A</sup>
	Euro 6	сентябрь 2015	1,81	0,13 <sup>**</sup>	-	0,075	0,005 <sup>*,A</sup>
N <sub>1</sub> , Класс III, >1760 кг	Euro 1	окт. 1994	6,90	-	1,70	-	-
	Euro 2	январь 1998	5,0	-	0,80	-	-
	Euro 3	январь 2001	5,22	0,29	-	0,21	-
	Euro 4	январь 2006	2,27	0,16	-	0,11	-
	Euro 5	сентябрь 2010	2,27	0,16 <sup>1</sup>	-	0,082	0,005 <sup>*,A</sup>
	Euro 6	сентябрь 2015	2,27	0,16 <sup>2</sup>	-	0,082	0,005 <sup>*,A</sup>

Нормы по ограничению токсичности отработавших газов автотранспортных ДВС в соответствии с требованиями (правилами) ЕЭК ООН 601 представлены в таблице 7.1.

Введение в действие технических нормативов выбросов в отношении автомобильной техники, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, осуществляется в следующие сроки:

а) экологического класса 2 (Евро – 2) - с даты вступления в силу настоящего регламента;

- б) экологического класса 3 (Евро – 3) - с 1 января 2010 г.;
- в) экологического класса 4 (Евро – 4) - с 1 января 2012 г.;
- г) экологического класса 5 (Евро – 5) - с 1 января 2014 г.

### 7.3 Выводы по разделу безопасность и экологичность

1. Токсичность отработавших газов проектируемого двигателя по сравнению с базовым двигателем характеризуется следующим образом:

- по несгоревшим углеводородам (СН) – возрастает ввиду увеличения площади поверхности камеры сгорания увеличится, что приведет к большему содержанию несгоревших углеводородов в пристеночном замороженном слое.
- по концентрации оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) в отработавших газах (ОГ) отмечено снижение которое, обеспечивается за счет понижения температуры в процессе сгорания из-за повышения оборотов двигателя увеличивающих продолжительность процесса сгорания по углу поворота КВ и уменьшающего по времени, а также за счет увеличения расстояния проходимого пламенем в процессе сгорания, что снижает концентрацию термических оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) в ОГ согласно теории академика Зельдовича.

В целом спроектированный двигатель прогнозируется как удовлетворяющий предъявляемым требованиям по токсичности, при условии комплектовании его трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе спроектирован новый автомобильный двигатель с искровым зажиганием работающий на спирте (этаноле), выполняющий нормы ЕВРО-4. Проведены основные расчеты двигателя, а именно, тепловой, кинематический, динамический, основных деталей и систем двигателя, проведена оценка влияния спирта как моторного топлива на эффективность процесса сгорания и токсичность отработавших газов.

Получено в двигателе на альтернативном топливе (спирте) следующие основные показатели:

- минимальный удельный эффективный расход топлива  $775 \text{ г/кВт*ч}$ ;
- максимальную мощность при номинальных оборотах  $n=5600 \text{ мин}^{-1}$  -  $81 \text{ кВт}$ ;
- снижение токсичности в отработавших газах по несгоревшим углеводородам (СН), оксидам углерода (СО) и оксидам азота, также произойдет

В разделе «Безопасность и экологичность проекта» показано что, спроектированный двигатель выполняет нормы по ограничению токсичности отработавших газов автотранспортных ДВС ОСТ 37.001.234-84 согласно правилам ЕЭК ООН (N 24 , N 49 , N 83 , N 96), а также ГОСТ Р 52231-04 «Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения» согласно Правилам ЕЭК ООН №51.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
2. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.
3. Ховаха, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.
4. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. - с.528.
5. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /Д.Н. Вырубков, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. –4-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984. – с.384
6. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
7. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
8. Кузнецов, Ю.М. Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта [Текст] /. М.: Транспорт, 1986.

9. Луканин, В.Н. Промышленная транспортная экология [Текст] / М.: Высшая школа, 2001.
10. Долин, П.А. Справочник по технике безопасности [Текст] / М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Dake, A.R. Modeling and control of cold start hydrocarbon emissions [Текст] / A.R. Dake // Master thesis. – 2005. - 101 с.
12. El-Mahallawy, F. Fundamentals and technology of combustion [Текст] / F. El-Mahallawy, S. E-Din Habik. – London : Elsevier, 2002. – 862 с.
13. Eriksson, L. Spark Advance Modeling and Control / L. Eriksson [Текст] // Doctoral thesis. – 1999. - 207 с.
14. Кузнецов, В.Р. Турбулентность и горение [Текст] / Кузнецов, В.Р., Собольников В.А.// М. Наука, 1986. - 207 с.
15. Войнов, В.В. Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / М. Наука, 1984. - 211 с.
16. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / М. Машиностроение, 1981. - 210 с.
17. Nlootat, G. A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours [Текст] / SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
18. Khalighi, B. Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations [Текст] / SAE, SP 1101, №950287, 2001. - с. 147-179,
19. Jones, P. Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment [Текст] / SAE, SP 1101, №950286, 2001. - с. 131-146
20. Наканиши, К. Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях [Текст] / SAE, SP 1097, №95050, 1997. - с. 25-43
21. Хашимото, Н. Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя [Текст] / SAE, SP 1098, №95068, 1998. - с. 347-365

22. Аносов, Ю.М. Основы отраслевых технологий и организации производства [Текст] / С-П., Политехника, 2002.
23. Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением : канд. техн. наук : 05.08.05 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.
24. Каменев, В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием: Дисс. . докт.техн.наук: 05.04.02 ГНЦ НАМИ / Каменев Владимир Федорович. - Москва, 1996. - 454 с.
25. Кутенёв, В.Ф. Комплексное решение проблем снижения выбросов вредных веществ и расхода топлива автомобильными двигателями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. 05.04.02 / Кутенёв Вадим Федорович. - М.: МАМИ. - 1990. - 45 с.
26. Машиностроение. Энциклопедия [Текст] /: в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
27. Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя [Текст] // Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
28. Смоленская, Н.М. Исследование эффективности рабочего процесса бензиновых двигателей с использованием электропроводности пламени [Текст] / Н.М. Смоленская, В.В. Смоленский, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // ВНТК "Проведение научных исследований в области машиностроения". 27-28 ноября 2009. Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2009. С.244-250.
29. Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М. : АН СССР, 1960. – 200 с.
30. Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей : автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_u$	$T_u$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
15	40	1	10,5	1,0524	1,824	767,539	1,002	0,9000	49,7618	0,0431	0,2930	3					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m <sub>1-2</sub>	X
0	-15	0,11538	0,0439	1,2085	1,3E-06	767,5393	767,5393	781,2473	767,5393	774,3933			2,7E-06	1,824	1	1	0
1	-14	0,11283	0,0383	1,1819	2E-05	781,2473	781,2473	787,7863	773,821	784,5168	1,358	6,5859	4E-05	1,88041	1	1	2,7E-06
2	-13	0,11046	0,0331	1,157	8,8E-05	787,7863	787,7863	794,6313	780,261	791,2088	1,3568	6,606	0,00018	1,93683	1	1	4,32E-05
3	-12	0,10825	0,0282	1,1339	0,00024	794,6313	794,6313	802,2602	787,3357	798,4457	1,3559	6,6191	0,00047	1,9942	1	1	0,000219
4	-11	0,10622	0,0237	1,1126	0,0005	802,2602	802,2602	811,3233	795,7069	806,7917	1,355	6,6332	0,00099	2,05398	1	1	0,000691
5	-10	0,10436	0,0196	1,0932	0,0009	811,3233	811,3233	822,6425	806,2218	816,9829	1,354	6,6492	0,00181	2,11826	1,0001	1,0001	0,001685
6	-9	0,10268	0,0159	1,0755	0,00148	822,6425	822,6425	837,2025	819,9001	829,9225	1,3528	6,6686	0,00297	2,18969	1,0002	1,0001	0,003491
7	-8	0,10117	0,0126	1,0597	0,00227	837,2025	837,2025	856,1305	837,9102	846,6665	1,3513	6,6927	0,00453	2,27144	1,0003	1,0003	0,006458
8	-7	0,09984	0,0096	1,0457	0,00328	856,1305	856,1305	880,6642	861,5332	868,3973	1,3495	6,7232	0,00656	2,36712	1,0006	1,0004	0,010992
9	-6	0,09868	0,0071	1,0336	0,00454	880,6642	880,6642	912,1048	892,1128	896,3845	1,3471	6,7614	0,00907	2,48057	1,0009	1,0007	0,017549
10	-5	0,0977	0,0049	1,0234	0,00606	912,1048	912,1048	951,7581	930,9896	931,9314	1,3443	6,8086	0,01211	2,61566	1,0013	1,0011	0,026624
11	-4	0,0969	0,0031	1,015	0,00784	951,7581	951,7581	1000,864	979,4246	976,3112	1,341	6,8655	0,01568	2,776	1,0019	1,0016	0,038738
12	-3	0,09627	0,0018	1,0084	0,00988	1000,864	1000,864	1060,521	1038,513	1030,693	1,3372	6,932	0,01976	2,96463	1,0027	1,0023	0,054418
13	-2	0,09583	0,0008	1,0037	0,01215	1060,521	1060,521	1131,605	1109,099	1096,063	1,3329	7,0076	0,0243	3,18371	1,0037	1,0032	0,074175
14	-1	0,09556	0,0002	1,0009	0,01461	1131,605	1131,605	1214,691	1191,69	1173,148	1,3284	7,0907	0,02922	3,43416	1,0049	1,0043	0,098471
15	0	0,09547	0	1	0,0172	1214,691	1214,691	1309,976	1286,39	1262,333	1,3237	7,1792	0,0344	3,7155	1,0064	1,0057	0,127688
16	1	0,09556	0,0002	1,0009	0,01985	1309,976	1309,976	1417,207	1392,831	1363,591	1,3189	7,2708	0,03969	4,02557	1,0081	1,0073	0,16209
17	2	0,09583	0,0008	1,0037	0,02245	1417,207	1417,207	1535,623	1510,141	1476,415	1,3143	7,363	0,0449	4,36046	1,0101	1,0091	0,201784
18	3	0,09627	0,0018	1,0084	0,0249	1535,623	1535,623	1663,907	1636,915	1599,765	1,3099	7,4534	0,0498	4,71452	1,0124	1,0113	0,246685
19	4	0,0969	0,0031	1,015	0,02707	1663,907	1663,907	1800,172	1771,227	1732,039	1,3058	7,5398	0,05415	5,0804	1,0149	1,0137	0,296483
20	5	0,0977	0,0049	1,0234	0,02885	1800,172	1800,172	1941,979	1910,667	1871,075	1,3021	7,6207	0,05769	5,44935	1,0176	1,0163	0,350628
21	6	0,09868	0,0071	1,0336	0,03011	1941,979	1941,979	2086,405	2052,422	2014,192	1,2987	7,6948	0,06022	5,81155	1,0205	1,0191	0,408323
22	7	0,09984	0,0096	1,0457	0,03076	2086,405	2086,405	2230,159	2193,397	2158,282	1,2958	7,7614	0,06151	6,15661	1,0236	1,022	0,468539
23	8	0,10117	0,0126	1,0597	0,03073	2230,159	2230,159	2369,757	2330,368	2299,958	1,2933	7,82	0,06145	6,47419	1,0266	1,0251	0,530052

24	9	0,10268	0,0159	1,0755	0,02999	2369,757	2369,757	2501,728	2460,172	2435,742	1,2911	7,8706	0,05998	6,75465	1,0297	1,0282	0,591505
25	10	0,10436	0,0196	1,0932	0,02857	2501,728	2501,728	2622,858	2579,9	2562,293	1,2893	7,9133	0,05713	6,98975	1,0327	1,0312	0,651486
26	11	0,10622	0,0237	1,1126	0,02652	2622,858	2622,858	2730,424	2687,09	2676,641	1,2878	7,9486	0,05304	7,1732	1,0356	1,0342	0,708618
27	12	0,10825	0,0282	1,1339	0,02397	2730,424	2730,424	2822,406	2779,89	2776,415	1,2867	7,9771	0,04794	7,30115	1,0383	1,037	0,761661
28	13	0,11046	0,0331	1,157	0,02105	2822,406	2822,406	2897,627	2857,171	2860,016	1,2857	7,9992	0,04211	7,37239	1,0407	1,0395	0,809597
29	14	0,11283	0,0383	1,1819	0,01795	2897,627	2897,627	2955,825	2918,574	2926,726	1,2851	8,0159	0,0359	7,38835	1,0428	1,0418	0,851705
30	15	0,11538	0,0439	1,2085	0,01483	2955,825	2955,825	2997,61	2964,489	2976,717	1,2846	8,0277	0,02966	7,35284	1,0446	1,0437	0,887605
31	16	0,11809	0,0499	1,237	0,01185	2997,61	2997,61	3024,341	2995,963	3010,976	1,2843	8,0355	0,0237	7,27158	1,0461	1,0454	0,917261
32	17	0,12097	0,0562	1,2671	0,00914	3024,341	3024,341	3037,93	3014,548	3031,136	1,2841	8,04	0,01828	7,15157	1,0473	1,0467	0,940959
33	18	0,12402	0,063	1,2991	0,0068	3037,93	3037,93	3040,595	3022,123	3039,262	1,284	8,0418	0,0136	7,00041	1,0482	1,0478	0,959243
34	19	0,12723	0,07	1,3327	0,00486	3040,595	3040,595	3034,626	3020,7	3037,61	1,284	8,0414	0,00973	6,82568	1,0489	1,0486	0,97284
35	20	0,13061	0,0775	1,3681	0,00334	3034,626	3034,626	3022,176	3012,245	3028,401	1,2841	8,0395	0,00668	6,63439	1,0494	1,0491	0,982566
36	21	0,13414	0,0853	1,4051	0,0022	3022,176	3022,176	3005,117	2998,547	3013,647	1,2842	8,0364	0,00439	6,43264	1,0497	1,0496	0,989245
37	22	0,13784	0,0934	1,4438	0,00138	3005,117	3005,117	2984,963	2981,123	2995,04	1,2844	8,0325	0,00276	6,22543	1,0499	1,0498	0,993637
38	23	0,14169	0,1019	1,4842	0,00083	2984,963	2984,963	2962,857	2961,184	2973,91	1,2846	8,028	0,00166	6,01663	1,0501	1,05	0,996399
39	24	0,1457	0,1108	1,5262	0,00047	2962,857	2962,857	2939,61	2939,641	2951,233	1,2848	8,0232	0,00094	5,8091	1,0502	1,0501	0,998055
40	25	0,14987	0,12	1,5698	0,00026	2939,61	2939,61	2915,765	2917,144	2927,688	1,285	8,0181	0,00051	5,60484	1,0502	1,0502	0,999

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
20	50	1	10,5	1,0524	1,469764	728,3487	1,042832	0,923	49,36373	0,03661	0,293	3,2					
Расчёт процесса сгорания																	
$f$	$f_1$	$V_{ст}$	$s$	$y(f_1)$	X1-2	$T_{пред}$	$T_1$	$T_2$	$T_{Истина}$	T1-2	k1-2	K1-2	$DX_{1-2}$	P	m	m1-2	X
0	-20	0,13587	0,07749	1,36807	0,00000	728,3487	728,3487	743,922	728,3487	736,1353			0,00000	1,46976	1	1	0
1	-19	0,13236	0,07005	1,33271	0,00000	743,922	743,922	750,8951	735,3374	747,4085	1,36319	6,50672	0,00001	1,52323	1	1	5E-07
2	-18	0,12902	0,06296	1,29907	0,00002	750,8951	750,8951	758,056	742,305	754,4755	1,36162	6,53066	0,00004	1,57749	1	1	9E-06
3	-17	0,12585	0,05624	1,26715	0,00006	758,056	758,056	765,6327	749,3838	761,8443	1,36066	6,54543	0,00012	1,63265	1	1	5E-05
4	-16	0,12285	0,04989	1,23696	0,00013	765,6327	765,6327	773,9218	756,7638	769,7772	1,35967	6,56063	0,00027	1,68897	1	1	0,0002
5	-15	0,12003	0,04390	1,20853	0,00025	773,9218	773,9218	783,2864	764,7077	778,6041	1,35863	6,57680	0,00050	1,74686	1	1	0,0004
6	-14	0,11738	0,03829	1,18187	0,00043	783,2864	783,2864	794,1516	773,5517	788,719	1,35749	6,59453	0,00085	1,80696	1	1	0,0009
7	-13	0,11491	0,03305	1,15699	0,00067	794,1516	794,1516	806,9993	783,7063	800,5755	1,35622	6,61453	0,00134	1,87011	1,0001	1,0001	0,0018

8	-12	0,11262	0,02819	1,13391	0,00100	806,9993	806,9993	822,3585	795,6527	814,6789	1,35476	6,63754	0,00200	1,93738	1,0002	1,0001	0,0031
9	-11	0,11050	0,02371	1,11263	0,00142	822,3585	822,3585	840,7946	809,9381	831,5765	1,35309	6,66430	0,00285	2,01006	1,0003	1,0002	0,0051
10	-10	0,10857	0,01961	1,09316	0,00195	840,7946	840,7946	862,8942	827,1665	851,8444	1,35115	6,69551	0,00390	2,08963	1,0004	1,0003	0,008
11	-9	0,10682	0,01590	1,07552	0,00260	862,8942	862,8942	889,2479	847,9864	876,071	1,34893	6,73177	0,00520	2,17773	1,0006	1,0005	0,0119
12	-8	0,10525	0,01257	1,05971	0,00337	889,2479	889,2479	920,4298	873,075	904,8388	1,34641	6,77349	0,00674	2,27614	1,0009	1,0007	0,0171
13	-7	0,10386	0,00963	1,04574	0,00428	920,4298	920,4298	956,9759	903,1181	938,7028	1,34359	6,82090	0,00856	2,38662	1,0012	1,001	0,0238
14	-6	0,10266	0,00708	1,03363	0,00532	956,9759	956,9759	999,3608	938,7879	978,1683	1,34049	6,87392	0,01065	2,51094	1,0016	1,0014	0,0324
15	-5	0,10164	0,00492	1,02336	0,00651	999,3608	999,3608	1047,975	980,7175	1023,668	1,33714	6,93221	0,01302	2,65068	1,0022	1,0019	0,043
16	-4	0,10080	0,00315	1,01496	0,00783	1047,975	1047,975	1103,101	1029,474	1075,538	1,33360	6,99516	0,01566	2,80718	1,0028	1,0025	0,056
17	-3	0,10015	0,00177	1,00842	0,00928	1103,101	1103,101	1164,892	1085,531	1133,997	1,32993	7,06191	0,01855	2,98139	1,0036	1,0032	0,0717
18	-2	0,09969	0,00079	1,00374	0,01084	1164,892	1164,892	1233,354	1149,239	1199,123	1,32619	7,13144	0,02167	3,17380	1,0046	1,0041	0,0902
19	-1	0,09941	0,00020	1,00094	0,01249	1233,354	1233,354	1308,324	1220,8	1270,839	1,32245	7,20261	0,02498	3,38430	1,0057	1,0051	0,1119
20	0	0,09932	0,00000	1,00000	0,01421	1308,324	1308,324	1389,459	1300,237	1348,891	1,31876	7,27424	0,02842	3,61212	1,0069	1,0063	0,1369
21	1	0,09941	0,00020	1,00094	0,01596	1389,459	1389,459	1476,226	1387,371	1432,842	1,31520	7,34521	0,03192	3,85576	1,0084	1,0076	0,1653
22	2	0,09969	0,00079	1,00374	0,01770	1476,226	1476,226	1567,896	1481,803	1522,061	1,31179	7,41449	0,03540	4,11291	1,01	1,0092	0,1972
23	3	0,10015	0,00177	1,00842	0,01938	1567,896	1567,896	1663,55	1582,892	1615,723	1,30859	7,48118	0,03876	4,38050	1,0118	1,0109	0,2326
24	4	0,10080	0,00315	1,01496	0,02095	1663,55	1663,55	1762,091	1689,756	1712,821	1,30560	7,54452	0,04189	4,65472	1,0137	1,0127	0,2714
25	5	0,10164	0,00492	1,02336	0,02235	1762,091	1762,091	1862,262	1801,265	1812,177	1,30285	7,60395	0,04470	4,93105	1,0158	1,0148	0,3133
26	6	0,10266	0,00708	1,03363	0,02353	1862,262	1862,262	1962,683	1916,067	1912,473	1,30034	7,65902	0,04706	5,20444	1,0181	1,017	0,358
27	7	0,10386	0,00963	1,04574	0,02443	1962,683	1962,683	2061,89	2032,605	2012,286	1,29809	7,70946	0,04886	5,46946	1,0205	1,0193	0,4051
28	8	0,10525	0,01257	1,05971	0,02501	2061,89	2061,89	2158,385	2149,17	2110,137	1,29607	7,75509	0,05002	5,72048	1,023	1,0217	0,4539
29	9	0,10682	0,01590	1,07552	0,02523	2158,385	2158,385	2250,695	2263,95	2204,54	1,29430	7,79588	0,05046	5,95196	1,0255	1,0242	0,5039
30	10	0,10857	0,01961	1,09316	0,02507	2250,695	2250,695	2337,432	2375,104	2294,064	1,29275	7,83186	0,05013	6,15866	1,028	1,0268	0,5544
31	11	0,11050	0,02371	1,11263	0,02451	2337,432	2337,432	2417,351	2480,833	2377,392	1,29141	7,86315	0,04902	6,33593	1,0306	1,0293	0,6045
32	12	0,11262	0,02819	1,13391	0,02357	2417,351	2417,351	2489,405	2579,464	2453,378	1,29028	7,88994	0,04714	6,47993	1,0331	1,0318	0,6535
33	13	0,11491	0,03305	1,15699	0,02227	2489,405	2489,405	2552,794	2669,525	2521,1	1,28933	7,91245	0,04454	6,58785	1,0354	1,0342	0,7007
34	14	0,11738	0,03829	1,18187	0,02067	2552,794	2552,794	2606,992	2749,819	2579,893	1,28856	7,93097	0,04134	6,65804	1,0377	1,0366	0,7452
35	15	0,12003	0,04390	1,20853	0,01882	2606,992	2606,992	2651,769	2819,474	2629,381	1,28794	7,94580	0,03763	6,69008	1,0398	1,0387	0,7866
36	16	0,12285	0,04989	1,23696	0,01679	2651,769	2651,769	2687,186	2877,983	2669,478	1,28747	7,95727	0,03359	6,68480	1,0417	1,0407	0,8242
37	17	0,12585	0,05624	1,26715	0,01468	2687,186	2687,186	2713,574	2925,216	2700,38	1,28712	7,96575	0,02935	6,64414	1,0434	1,0425	0,8578
38	18	0,12902	0,06296	1,29907	0,01255	2713,574	2713,574	2731,505	2961,408	2722,539	1,28688	7,97158	0,02509	6,57107	1,0449	1,0441	0,8871
39	19	0,13236	0,07005	1,33271	0,01048	2731,505	2731,505	2741,734	2987,124	2736,619	1,28673	7,97510	0,02097	6,46932	1,0461	1,0455	0,9122
40	20	0,13587	0,07749	1,36807	0,00855	2741,734	2741,734	2745,152	3003,206	2743,443	1,28667	7,97666	0,01710	6,34313	1,0472	1,0467	0,9332

41	21	0,13955	0,08529	1,40511	0,00680	2745,152	2745,152	2742,717	3010,697	2743,934	1,286673	7,97658	0,01360	6,19701	1,0481	1,0476	0,9503
42	22	0,14340	0,09344	1,44382	0,00527	2742,717	2742,717	2735,404	3010,767	2739,061	1,286733	7,97514	0,01053	6,03545	1,0488	1,0484	0,9639
43	23	0,14741	0,10194	1,48419	0,00397	2735,404	2735,404	2724,151	3004,631	2729,778	1,286837	7,97261	0,00794	5,86274	1,0493	1,049	0,9744
44	24	0,15158	0,11078	1,52619	0,00290	2724,151	2724,151	2709,819	2993,48	2716,985	1,286976	7,96922	0,00581	5,68277	1,0497	1,0495	0,9824
45	25	0,15591	0,11996	1,56981	0,00206	2709,819	2709,819	2693,168	2978,418	2701,493	1,287144	7,96516	0,00413	5,49891	1,05	1,0498	0,9882
46	26	0,16040	0,12948	1,61501	0,00142	2693,168	2693,168	2674,837	2960,425	2684,002	1,287332	7,96058	0,00284	5,31398	1,0502	1,0501	0,9923
47	27	0,16504	0,13932	1,66178	0,00094	2674,837	2674,837	2655,352	2940,33	2665,095	1,287537	7,95562	0,00189	5,13021	1,0503	1,0503	0,9951
48	28	0,16984	0,14950	1,71010	0,00061	2655,352	2655,352	2635,12	2918,806	2645,236	1,287754	7,95038	0,00122	4,94932	1,0504	1,0504	0,997
49	29	0,17479	0,15999	1,75995	0,00038	2635,12	2635,12	2614,454	2896,376	2624,787	1,28798	7,94493	0,00075	4,77255	1,0505	1,0505	0,9982
50	30	0,17989	0,17080	1,81129	0,00023	2614,454	2614,454	2593,579	2873,43	2604,016	1,288212	7,93934	0,00045	4,60075	1,0505	1,0505	0,999

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
30	60	1	10,5	1,0524	0,9645	653,4471	1,0769	0,96	49,8412	0,0341	0,2930	3,4					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-30	0,1858	0,1708	1,8113	5,2E-08	653,4471	653,4471	667,0646	653,4471	660,2559			1,04E-07	0,96449	1	1	0
1	-29	0,1805	0,16	1,7599	1E-06	667,0646	667,0646	674,2125	660,5437	670,6386	1,37517	6,33096	2,08E-06	1,0034	1	1	1,04E-07
2	-28	0,1754	0,1495	1,7101	5,4E-06	674,2125	674,2125	681,4641	667,7069	677,8383	1,37337	6,35664	1,08E-05	1,04385	1	1	2,19E-06
3	-27	0,1704	0,1393	1,6618	1,7E-05	681,4641	681,4641	688,8796	674,9845	685,1719	1,37215	6,37413	3,32E-05	1,08591	1	1	1,3E-05
4	-26	0,1656	0,1295	1,615	3,9E-05	688,8796	688,8796	696,547	682,4398	692,7133	1,37094	6,39169	7,71E-05	1,1297	1	1	4,62E-05
5	-25	0,161	0,12	1,5698	7,6E-05	696,547	696,547	704,5849	690,1657	700,5659	1,36972	6,40949	0,000152	1,17539	1,00001	1	0,000123
6	-24	0,1565	0,1108	1,5262	0,00013	704,5849	704,5849	713,1443	698,2871	708,8646	1,36848	6,42774	0,000267	1,22321	1,00001	1,00001	0,000275
7	-23	0,1522	0,1019	1,4842	0,00022	713,1443	713,1443	722,41	706,9626	717,7772	1,36719	6,44674	0,000433	1,27347	1,00003	1,00002	0,000542
8	-22	0,1481	0,0934	1,4438	0,00033	722,41	722,41	732,601	716,3863	727,5055	1,36584	6,46681	0,000661	1,32655	1,00005	1,00004	0,000975
9	-21	0,1441	0,0853	1,4051	0,00048	732,601	732,601	743,9706	726,7881	738,2858	1,36441	6,48834	0,000964	1,38293	1,00008	1,00007	0,001636
10	-20	0,1403	0,0775	1,3681	0,00068	743,9706	743,9706	756,8051	738,4335	750,3879	1,36286	6,51175	0,001352	1,44319	1,00013	1,00011	0,0026
11	-19	0,1367	0,07	1,3327	0,00092	756,8051	756,8051	771,4224	751,623	764,1138	1,36118	6,53747	0,001838	1,50803	1,0002	1,00017	0,003951
12	-18	0,1332	0,063	1,2991	0,00122	771,4224	771,4224	788,1677	766,6895	779,795	1,35933	6,56595	0,002434	1,57822	1,00029	1,00025	0,005789
13	-17	0,13	0,0562	1,2671	0,00158	788,1677	788,1677	807,4102	783,9948	797,789	1,35729	6,59763	0,003152	1,65468	1,00042	1,00036	0,008223
14	-16	0,1269	0,0499	1,237	0,002	807,4102	807,4102	829,5362	803,9249	818,4732	1,35506	6,63288	0,004004	1,73839	1,00058	1,0005	0,011375

15	-15	0,1239	0,0439	1,2085	0,0025	829,5362	829,5362	854,9423	826,8837	842,2392	1,35261	6,67202	0,004999	1,83043	1,00078	1,00068	0,015379
16	-14	0,1212	0,0383	1,1819	0,00307	854,9423	854,9423	884,0268	853,2851	869,4845	1,34994	6,71527	0,006146	1,93192	1,00103	1,00091	0,020378
17	-13	0,1187	0,0331	1,157	0,00373	884,0268	884,0268	917,1806	883,5443	900,6037	1,34706	6,76271	0,007454	2,04403	1,00134	1,00119	0,026524
18	-12	0,1163	0,0282	1,1339	0,00446	917,1806	917,1806	954,7759	918,0673	935,9783	1,34398	6,81428	0,008927	2,16788	1,00172	1,00153	0,033978
19	-11	0,1141	0,0237	1,1126	0,00528	954,7759	954,7759	997,1559	957,2398	975,9659	1,34073	6,86979	0,010568	2,30457	1,00218	1,00195	0,042906
20	-10	0,1121	0,0196	1,0932	0,00619	997,1559	997,1559	1044,623	1001,415	1020,889	1,33733	6,92886	0,012375	2,45507	1,00271	1,00244	0,053474
21	-9	0,1103	0,0159	1,0755	0,00717	1044,623	1044,623	1097,424	1050,903	1071,023	1,33383	6,99101	0,014342	2,62017	1,00334	1,00303	0,065848
22	-8	0,1087	0,0126	1,0597	0,00823	1097,424	1097,424	1155,745	1105,955	1126,585	1,33027	7,0556	0,01646	2,80046	1,00407	1,0037	0,08019
23	-7	0,1072	0,0096	1,0457	0,00936	1155,745	1155,745	1219,69	1166,754	1187,717	1,32669	7,12194	0,018714	2,99619	1,0049	1,00448	0,096651
24	-6	0,106	0,0071	1,0336	0,01054	1219,69	1219,69	1289,275	1233,397	1254,482	1,32314	7,18926	0,021081	3,20731	1,00585	1,00537	0,115364
25	-5	0,105	0,0049	1,0234	0,01177	1289,275	1289,275	1364,415	1305,889	1326,845	1,31965	7,2568	0,023535	3,43332	1,00692	1,00638	0,136445
26	-4	0,1041	0,0031	1,015	0,01302	1364,415	1364,415	1444,913	1384,127	1404,664	1,31627	7,3238	0,026041	3,67327	1,00811	1,00751	0,159979
27	-3	0,1034	0,0018	1,0084	0,01428	1444,913	1444,913	1530,452	1467,891	1487,682	1,31301	7,38957	0,028559	3,92573	1,00943	1,00877	0,18602
28	-2	0,1029	0,0008	1,0037	0,01552	1530,452	1530,452	1620,588	1556,833	1575,52	1,30991	7,45346	0,031043	4,18873	1,01088	1,01016	0,21458
29	-1	0,1027	0,0002	1,0009	0,01672	1620,588	1620,588	1714,748	1650,476	1667,668	1,30699	7,51495	0,033441	4,45979	1,01245	1,01167	0,245623
30	0	0,1026	0	1	0,01785	1714,748	1714,748	1812,229	1748,206	1763,489	1,30425	7,57356	0,035697	4,73593	1,01415	1,0133	0,279064
31	1	0,1027	0,0002	1,0009	0,01888	1812,229	1812,229	1912,204	1849,278	1862,216	1,30171	7,62895	0,037752	5,01371	1,01596	1,01505	0,314761
32	2	0,1029	0,0008	1,0037	0,01977	1912,204	1912,204	2013,732	1952,818	1962,968	1,29936	7,68084	0,039546	5,28931	1,01787	1,01692	0,352513
33	3	0,1034	0,0018	1,0084	0,02051	2013,732	2013,732	2115,778	2057,838	2064,755	1,29722	7,72906	0,041021	5,55861	1,01988	1,01888	0,392059
34	4	0,1041	0,0031	1,015	0,02106	2115,778	2115,778	2217,229	2163,256	2166,503	1,29527	7,77349	0,042122	5,81735	1,02196	1,02092	0,43308
35	5	0,105	0,0049	1,0234	0,0214	2217,229	2217,229	2316,927	2267,914	2267,078	1,29351	7,81408	0,042804	6,06119	1,02409	1,02303	0,475202
36	6	0,106	0,0071	1,0336	0,02151	2316,927	2316,927	2413,7	2370,614	2365,314	1,29193	7,85086	0,043027	6,28595	1,02626	1,02518	0,518006
37	7	0,1072	0,0096	1,0457	0,02138	2413,7	2413,7	2506,394	2470,145	2460,047	1,29053	7,88387	0,042768	6,48771	1,02845	1,02736	0,561033
38	8	0,1087	0,0126	1,0597	0,02101	2506,394	2506,394	2593,918	2565,327	2550,156	1,2893	7,91321	0,042015	6,66297	1,03061	1,02953	0,6038
39	9	0,1103	0,0159	1,0755	0,02039	2593,918	2593,918	2675,274	2655,044	2634,596	1,28823	7,93902	0,040776	6,80883	1,03274	1,03168	0,645815
40	10	0,1121	0,0196	1,0932	0,01954	2675,274	2675,274	2749,598	2738,286	2712,436	1,2873	7,96145	0,039074	6,92303	1,03481	1,03378	0,686592
41	11	0,1141	0,0237	1,1126	0,01848	2749,598	2749,598	2816,191	2814,183	2782,895	1,28651	7,98067	0,036951	7,00412	1,03679	1,0358	0,725666
42	12	0,1163	0,0282	1,1339	0,01723	2816,191	2816,191	2874,539	2882,038	2845,365	1,28584	7,99689	0,034465	7,05148	1,03867	1,03773	0,762617
43	13	0,1187	0,0331	1,157	0,01584	2874,539	2874,539	2924,337	2941,348	2899,438	1,28529	8,01031	0,031685	7,0653	1,04041	1,03954	0,797082
44	14	0,1212	0,0383	1,1819	0,01435	2924,337	2924,337	2965,488	2991,823	2944,913	1,28485	8,02115	0,028695	7,04661	1,04202	1,04122	0,828767
45	15	0,1239	0,0439	1,2085	0,01279	2965,488	2965,488	2998,106	3033,388	2981,797	1,28451	8,02962	0,025582	6,99717	1,04348	1,04275	0,857462
46	16	0,1269	0,0499	1,237	0,01122	2998,106	2998,106	3022,497	3066,182	3010,301	1,28425	8,03596	0,022436	6,91938	1,04477	1,04412	0,883044
47	17	0,13	0,0562	1,2671	0,00967	3022,497	3022,497	3039,138	3090,539	3030,818	1,28407	8,0404	0,019343	6,81615	1,04591	1,04534	0,90548

48	18	0,1332	0,063	1,2991	0,00819	3039,138	3039,138	3048,647	3106,964	3043,893	1,28396	8,04314	0,016381	6,69077	1,04689	1,0464	0,924823
49	19	0,1367	0,07	1,3327	0,00681	3048,647	3048,647	3051,744	3116,104	3050,195	1,28391	8,0444	0,013616	6,5467	1,04772	1,04731	0,941203
50	20	0,1403	0,0775	1,3681	0,00555	3051,744	3051,744	3049,212	3118,707	3050,478	1,28391	8,04439	0,011101	6,38748	1,04841	1,04807	0,95482
51	21	0,1441	0,0853	1,4051	0,00443	3049,212	3049,212	3041,862	3115,583	3045,537	1,28396	8,04329	0,008868	6,21658	1,04898	1,04869	0,96592
52	22	0,1481	0,0934	1,4438	0,00347	3041,862	3041,862	3030,49	3107,564	3036,176	1,28404	8,04128	0,006936	6,03723	1,04942	1,0492	0,974789
53	23	0,1522	0,1019	1,4842	0,00265	3030,49	3030,49	3015,853	3095,471	3023,172	1,28415	8,03851	0,005307	5,8524	1,04978	1,0496	0,981725
54	24	0,1565	0,1108	1,5262	0,00198	3015,853	3015,853	2998,644	3080,077	3007,249	1,28429	8,03513	0,003969	5,66472	1,05005	1,04991	0,987032
55	25	0,161	0,12	1,5698	0,00145	2998,644	2998,644	2979,471	3062,09	2989,057	1,28444	8,03125	0,002898	5,4764	1,05025	1,05015	0,991001
56	26	0,1656	0,1295	1,615	0,00103	2979,471	2979,471	2958,858	3042,132	2969,164	1,28462	8,02698	0,002064	5,2893	1,05039	1,05032	0,993899
57	27	0,1704	0,1393	1,6618	0,00072	2958,858	2958,858	2937,235	3020,736	2948,046	1,2848	8,02242	0,001433	5,10488	1,0505	1,05045	0,995963
58	28	0,1754	0,1495	1,7101	0,00048	2937,235	2937,235	2914,949	2998,341	2926,092	1,285	8,01762	0,000968	4,92428	1,05057	1,05053	0,997396
59	29	0,1805	0,16	1,7599	0,00032	2914,949	2914,949	2892,271	2975,3	2903,61	1,2852	8,01264	0,000636	4,74832	1,05062	1,0506	0,998364
60	30	0,1858	0,1708	1,8113	0,0002	2892,271	2892,271	2869,405	2951,886	2880,838	1,28541	8,00754	0,000406	4,57759	1,05065	1,05064	0,999

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_u$	$T_u$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
40	70	1	10,5	1,052	0,637	573,619	1,079	0,97	50,446	0,030	0,293	3,6					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	TИстина	T1-2	k1-2	K1-2	DХ1-2	P	m	m <sub>1-2</sub>	X
0	-40	0,2469	0,295	2,4014	1,1E-08	573,619	573,6193	581,04	573,619	577,33			2,25E-08	0,63711	1	1	0
1	-39	0,2402	0,2814	2,3365	2,6E-07	581,04	581,0398	587,5	579,811	584,269	1,39185	6,103954	5,23E-07	0,66186	1	1	2,25E-08
2	-38	0,2336	0,268	2,2729	1,5E-06	587,497	587,4975	594,1	586,106	590,798	1,39028	6,124589	2,98E-06	0,68778	1	1	5,45E-07
3	-37	0,2272	0,2548	2,2105	4,9E-06	594,098	594,0978	600,88	592,521	597,487	1,38882	6,143712	9,7E-06	0,71494	1	1	3,52E-06
4	-36	0,221	0,242	2,1494	1,2E-05	600,877	600,8767	607,89	599,078	604,381	1,38737	6,163016	2,37E-05	0,7434	1	1	1,32E-05
5	-35	0,2148	0,2294	2,0896	2,4E-05	607,886	607,8856	615,19	605,816	611,539	1,38591	6,182614	4,85E-05	0,77327	1	1,000001	3,69E-05
6	-34	0,2088	0,2171	2,0311	4,4E-05	615,192	615,1922	622,88	612,782	619,037	1,38442	6,20265	8,81E-05	0,80467	1	1,000003	8,54E-05
7	-33	0,2029	0,2051	1,9741	7,4E-05	622,882	622,8819	631,06	620,042	626,97	1,3829	6,223308	0,000147	0,83776	1,00001	1,000007	0,000174
8	-32	0,1972	0,1933	1,9184	0,00012	631,058	631,0583	639,84	627,679	635,451	1,38133	6,244806	0,000231	0,8727	1,00002	1,000013	0,000321
9	-31	0,1916	0,1819	1,8641	0,00017	639,844	639,8438	649,38	635,791	644,612	1,37969	6,267391	0,000344	0,90972	1,00003	1,000022	0,000551
10	-30	0,1862	0,1708	1,8113	0,00025	649,38	649,3801	659,83	644,497	654,604	1,37798	6,291338	0,000492	0,94908	1,00005	1,000037	0,000895
11	-29	0,1809	0,16	1,7599	0,00034	659,828	659,8276	671,37	653,932	665,597	1,37616	6,316942	0,000682	0,99109	1,00007	1,000058	0,001387

12	-28	0,1758	0,1495	1,7101	0,00046	671,366	671,3657	684,19	664,254	677,778	1,37422	6,344506	0,000919	1,03611	1,00011	1,000088	0,002069
13	-27	0,1708	0,1393	1,6618	0,00061	684,191	684,1913	698,52	675,637	691,354	1,37214	6,374337	0,001211	1,08455	1,00015	1,000129	0,002988
14	-26	0,166	0,1295	1,615	0,00078	698,517	698,5175	714,57	688,274	706,545	1,36991	6,406728	0,001564	1,1369	1,00021	1,000183	0,004199
15	-25	0,1614	0,12	1,5698	0,00099	714,572	714,5722	732,6	702,377	723,584	1,36752	6,441946	0,001984	1,19368	1,00029	1,000254	0,005763
16	-24	0,1569	0,1108	1,5262	0,00124	732,596	732,5956	752,84	718,172	742,716	1,36495	6,480216	0,002479	1,25552	1,00039	1,000344	0,007748
17	-23	0,1526	0,1019	1,4842	0,00153	752,837	752,8369	775,55	735,9	764,194	1,36221	6,52171	0,003055	1,32307	1,00052	1,000458	0,010227
18	-22	0,1484	0,0934	1,4438	0,00186	775,551	775,5513	801	755,814	788,274	1,35929	6,566526	0,003718	1,39706	1,00068	1,000598	0,013282
19	-21	0,1444	0,0853	1,4051	0,00224	800,996	800,9963	829,43	778,174	815,212	1,35621	6,614682	0,004475	1,47828	1,00087	1,000771	0,017
20	-20	0,1406	0,0775	1,3681	0,00267	829,427	829,4269	861,09	803,246	845,259	1,35298	6,666107	0,00533	1,56755	1,00109	1,000979	0,021475
21	-19	0,137	0,07	1,3327	0,00314	861,091	861,0914	896,23	831,296	878,659	1,34961	6,720635	0,006289	1,66574	1,00136	1,001229	0,026805
22	-18	0,1335	0,063	1,2991	0,00368	896,226	896,2265	935,05	862,586	915,639	1,34614	6,778006	0,007355	1,77373	1,00168	1,001525	0,033095
23	-17	0,1303	0,0562	1,2671	0,00426	935,052	935,0516	977,76	897,372	956,408	1,34259	6,837877	0,00853	1,8924	1,00206	1,001872	0,04045
24	-16	0,1272	0,0499	1,237	0,00491	977,764	977,7641	1024,5	935,895	1001,15	1,33899	6,899829	0,009815	2,02261	1,00249	1,002276	0,048979
25	-15	0,1242	0,0439	1,2085	0,0056	1024,53	1024,533	1075,5	978,375	1050,01	1,33538	6,963385	0,011209	2,16517	1,00299	1,002743	0,058794
26	-14	0,1215	0,0383	1,1819	0,00635	1075,49	1075,494	1130,7	1025,01	1103,12	1,33178	7,028029	0,012708	2,32078	1,00356	1,003278	0,070003
27	-13	0,1189	0,0331	1,157	0,00715	1130,74	1130,743	1190,3	1075,97	1160,54	1,32823	7,093222	0,014308	2,49005	1,00421	1,003887	0,082711
28	-12	0,1166	0,0282	1,1339	0,008	1190,33	1190,33	1254,3	1131,37	1222,29	1,32476	7,158427	0,016	2,6734	1,00494	1,004575	0,097019
29	-11	0,1144	0,0237	1,1126	0,00889	1254,25	1254,253	1322,5	1191,3	1288,35	1,32138	7,223121	0,017772	2,87105	1,00575	1,005346	0,113019
30	-10	0,1124	0,0196	1,0932	0,00981	1322,45	1322,453	1394,8	1255,78	1358,63	1,31813	7,286815	0,019611	3,08299	1,00666	1,006206	0,130791
31	-9	0,1106	0,0159	1,0755	0,01075	1394,81	1394,809	1471,1	1324,79	1432,97	1,31501	7,349062	0,021498	3,3089	1,00766	1,007158	0,150402
32	-8	0,1089	0,0126	1,0597	0,01171	1471,13	1471,13	1551,2	1398,24	1511,14	1,31204	7,409467	0,023414	3,54811	1,00875	1,008204	0,1719
33	-7	0,1075	0,0096	1,0457	0,01267	1551,16	1551,157	1634,6	1475,94	1592,86	1,30923	7,467692	0,025332	3,79961	1,00994	1,009347	0,195314
34	-6	0,1063	0,0071	1,0336	0,01361	1634,55	1634,554	1720,9	1557,65	1677,73	1,30659	7,523457	0,027226	4,06197	1,01123	1,010588	0,220646
35	-5	0,1052	0,0049	1,0234	0,01453	1720,91	1720,91	1809,7	1643,05	1765,33	1,30411	7,576539	0,029065	4,33338	1,01262	1,011926	0,247872
36	-4	0,1043	0,0031	1,015	0,01541	1809,74	1809,741	1900,5	1731,72	1855,11	1,30181	7,62677	0,030817	4,61158	1,0141	1,013359	0,276937
37	-3	0,1037	0,0018	1,0084	0,01622	1900,49	1900,489	1992,5	1823,17	1946,51	1,29967	7,67403	0,032447	4,89393	1,01567	1,014883	0,307755
38	-2	0,1032	0,0008	1,0037	0,01696	1992,53	1992,533	2085,2	1916,8	2038,86	1,2977	7,718245	0,033918	5,17744	1,01732	1,016493	0,340201
39	-1	0,1029	0,0002	1,0009	0,0176	2085,19	2085,189	2177,7	2011,97	2131,46	1,29589	7,759381	0,035197	5,4588	1,01905	1,018183	0,37412
40	0	0,1028	0	1	0,01812	2177,73	2177,729	2269,4	2107,95	2223,56	1,29423	7,797435	0,036247	5,73444	1,02084	1,019942	0,409316
41	1	0,1029	0,0002	1,0009	0,01852	2269,39	2269,386	2359,4	2203,96	2314,38	1,29272	7,832434	0,037039	6,00069	1,02268	1,02176	0,445564
42	2	0,1032	0,0008	1,0037	0,01877	2359,37	2359,374	2446,9	2299,16	2403,14	1,29136	7,864429	0,037542	6,2538	1,02457	1,023626	0,482602
43	3	0,1037	0,0018	1,0084	0,01887	2446,9	2446,901	2531,2	2392,7	2489,05	1,29013	7,893489	0,037736	6,49008	1,02648	1,025524	0,520145
44	4	0,1043	0,0031	1,015	0,0188	2531,19	2531,192	2611,5	2483,72	2571,35	1,28903	7,9197	0,037603	6,70605	1,0284	1,02744	0,557881

45	5	0,1052	0,0049	1,0234	0,01857	2611,5	2611,501	2687,1	2571,37	2649,32	1,28805	7,943161	0,037134	6,89853	1,03032	1,029358	0,595484
46	6	0,1063	0,0071	1,0336	0,01817	2687,14	2687,135	2757,5	2654,82	2722,3	1,28719	7,963982	0,03633	7,06472	1,03221	1,03126	0,632618
47	7	0,1075	0,0096	1,0457	0,0176	2757,47	2757,472	2822	2733,32	2789,72	1,28644	7,982281	0,0352	7,20237	1,03406	1,03313	0,668949
48	8	0,1089	0,0126	1,0597	0,01688	2821,97	2821,973	2880,2	2806,18	2851,09	1,28579	7,998185	0,033762	7,30977	1,03585	1,034951	0,704149
49	9	0,1106	0,0159	1,0755	0,01602	2880,2	2880,202	2931,8	2872,82	2906,02	1,28523	8,011825	0,032044	7,38588	1,03757	1,036707	0,737911
50	10	0,1124	0,0196	1,0932	0,01504	2931,83	2931,832	2976,7	2932,77	2954,24	1,28476	8,023338	0,030082	7,4303	1,0392	1,038382	0,769955
51	11	0,1144	0,0237	1,1126	0,01396	2976,65	2976,654	3014,6	2985,67	2995,62	1,28438	8,032864	0,027921	7,4433	1,04073	1,039963	0,800037
52	12	0,1166	0,0282	1,1339	0,0128	3014,58	3014,583	3045,7	3031,31	3030,12	1,28407	8,040547	0,025609	7,42579	1,04215	1,041439	0,827958
53	13	0,1189	0,0331	1,157	0,0116	3045,65	3045,655	3070	3069,63	3057,84	1,28383	8,046531	0,023201	7,37925	1,04345	1,042802	0,853567
54	14	0,1215	0,0383	1,1819	0,01038	3070,02	3070,02	3087,9	3100,69	3078,98	1,28365	8,050959	0,020751	7,30568	1,04464	1,044044	0,876769
55	15	0,1242	0,0439	1,2085	0,00916	3087,94	3087,935	3099,8	3124,67	3093,84	1,28353	8,053975	0,018313	7,2075	1,04569	1,045163	0,89752
56	16	0,1272	0,0499	1,237	0,00797	3099,75	3099,753	3105,9	3141,9	3102,83	1,28346	8,055719	0,015938	7,08741	1,04662	1,046158	0,915833
57	17	0,1303	0,0562	1,2671	0,00684	3105,9	3105,902	3106,9	3152,78	3106,39	1,28343	8,056326	0,013672	6,94834	1,04744	1,047029	0,931771
58	18	0,1335	0,063	1,2991	0,00578	3106,87	3106,87	3103,2	3157,82	3105,03	1,28345	8,055929	0,011553	6,79332	1,04813	1,047783	0,945443
59	19	0,137	0,07	1,3327	0,0048	3103,19	3103,187	3095,4	3157,58	3099,3	1,2835	8,054649	0,00961	6,62536	1,04872	1,048425	0,956995
60	20	0,1406	0,0775	1,3681	0,00393	3095,4	3095,404	3084,1	3152,64	3089,74	1,28358	8,052605	0,007865	6,44737	1,04921	1,048964	0,966605
61	21	0,1444	0,0853	1,4051	0,00316	3084,07	3084,073	3069,7	3143,62	3076,9	1,28369	8,049904	0,006329	6,2621	1,04961	1,049409	0,97447
62	22	0,1484	0,0934	1,4438	0,0025	3069,74	3069,736	3052,9	3131,13	3061,32	1,28382	8,046644	0,005004	6,07206	1,04993	1,04977	0,980799
63	23	0,1526	0,1019	1,4842	0,00194	3052,9	3052,904	3034,1	3115,75	3043,48	1,28397	8,042914	0,003884	5,87951	1,05019	1,050058	0,985803
64	24	0,1569	0,1108	1,5262	0,00148	3034,05	3034,053	3013,6	3098,01	3023,83	1,28414	8,038794	0,002959	5,68638	1,05038	1,050285	0,989687
65	25	0,1614	0,12	1,5698	0,00111	3013,61	3013,61	2992	3078,41	3002,78	1,28432	8,034353	0,00221	5,49434	1,05053	1,050459	0,992646
66	26	0,166	0,1295	1,615	0,00081	2991,95	2991,952	2969,4	3057,39	2980,68	1,28451	8,02965	0,001617	5,30473	1,05065	1,05059	0,994856
67	27	0,1708	0,1393	1,6618	0,00058	2969,41	2969,405	2946,2	3035,31	2957,82	1,28471	8,024737	0,001159	5,11867	1,05073	1,050688	0,996473
68	28	0,1758	0,1495	1,7101	0,00041	2946,24	2946,243	2922,7	3012,49	2934,47	1,28491	8,019656	0,000812	4,93697	1,05079	1,050758	0,997632
69	29	0,1809	0,16	1,7599	0,00028	2922,69	2922,692	2898,9	2989,18	2910,81	1,28513	8,014443	0,000556	4,76027	1,05083	1,050809	0,998444
70	30	0,1862	0,1708	1,8113	0,00019	2898,93	2898,934	#3HAC!	2965,61	#3HAC!	1,28534	8,009127	0,000372	4,589	1,05086	1,050843	0,999

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
45	75	1	10,5	1,0524	0,5103	546,1115	1,1230	0,91	45,4968	0,0298	0,2933884	3,8					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	$\gamma(f1)$	X1-2	Tпред	T1	T2	TИстина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	$m_{1-2}$	X
0	-45	0,2934	0,36705	2,7435	3,45E-09	546,11	546,11	551,82	546,11	548,97			6,9E-09	0,510323	1	1	0
1	-44	0,2859	0,3522	2,6729	9,27E-08	551,82	551,82	557,67	551,81	554,75	1,399	6,02	1,85E-07	0,529258	1	1	6,9E-09
2	-43	0,2784	0,33757	2,6035	5,77E-07	557,67	557,67	563,70	557,62	560,69	1,397	6,03	1,15E-06	0,549099	1	1	1,92E-07
3	-42	0,2711	0,32318	2,5351	2,01E-06	563,70	563,70	569,97	563,54	566,84	1,396	6,05	4,01E-06	0,569893	1	1	1,35E-06
4	-41	0,2639	0,30903	2,4679	5,14E-06	569,97	569,97	576,55	569,58	573,26	1,394	6,07	1,03E-05	0,591697	1	1	5,36E-06
5	-40	0,2569	0,29511	2,4018	1,09E-05	576,55	576,55	583,54	575,77	580,05	1,393	6,09	2,19E-05	0,614574	1,000001	1,000001	1,56E-05
6	-39	0,2499	0,28146	2,3369	2,06E-05	583,54	583,54	591,03	582,11	587,29	1,391	6,11	4,11E-05	0,6386	1,000002	1,000001	3,75E-05
7	-38	0,2431	0,26805	2,2733	3,53E-05	591,03	591,03	599,16	588,66	595,10	1,390	6,13	7,06E-05	0,663864	1,000004	1,000003	7,86E-05
8	-37	0,2364	0,25492	2,2108	5,67E-05	599,16	599,16	608,05	595,44	603,60	1,388	6,16	0,000113	0,69047	1,000008	1,000006	0,000149
9	-36	0,2299	0,24205	2,1497	8,64E-05	608,05	608,05	617,85	602,51	612,95	1,386	6,18	0,000173	0,718541	1,000013	1,00001	0,000263
10	-35	0,2235	0,22946	2,0899	0,000126	617,85	617,85	628,72	609,94	623,29	1,384	6,21	0,000253	0,748223	1,000022	1,000018	0,000435
11	-34	0,2173	0,21715	2,0314	0,000178	628,72	628,72	640,83	617,80	634,78	1,382	6,23	0,000356	0,779684	1,000035	1,000029	0,000688
12	-33	0,2112	0,20512	1,9743	0,000244	640,83	640,83	654,36	626,17	647,60	1,380	6,27	0,000489	0,813121	1,000053	1,000044	0,001044
13	-32	0,2052	0,1934	1,9186	0,000327	654,36	654,36	669,49	635,17	661,93	1,377	6,30	0,000654	0,848763	1,000078	1,000066	0,001533
14	-31	0,1994	0,18197	1,8644	0,000429	669,49	669,49	686,41	644,89	677,95	1,375	6,34	0,000858	0,886868	1,000111	1,000095	0,002188
15	-30	0,1937	0,17085	1,8115	0,000552	686,41	686,41	705,30	655,46	695,85	1,372	6,37	0,001104	0,927736	1,000155	1,000133	0,003045
16	-29	0,1882	0,16004	1,7602	0,000699	705,30	705,30	726,34	667,03	715,82	1,369	6,42	0,001397	0,971704	1,000211	1,000183	0,004149
17	-28	0,1829	0,14954	1,7103	0,000872	726,34	726,34	749,72	679,74	738,03	1,366	6,46	0,001745	1,019149	1,000282	1,000247	0,005546
18	-27	0,1777	0,13936	1,662	0,001075	749,72	749,72	775,59	693,75	762,65	1,363	6,51	0,00215	1,070495	1,000371	1,000327	0,007291
19	-26	0,1727	0,12951	1,6152	0,00131	775,59	775,59	804,12	709,24	789,85	1,360	6,56	0,00262	1,126206	1,000481	1,000426	0,009441
20	-25	0,1679	0,11999	1,57	0,001579	804,12	804,12	835,44	726,38	819,78	1,356	6,62	0,003158	1,186795	1,000614	1,000547	0,012061
21	-24	0,1632	0,11081	1,5263	0,001886	835,44	835,44	869,66	745,38	852,55	1,352	6,67	0,003771	1,252817	1,000775	1,000695	0,015219
22	-23	0,1587	0,10197	1,4843	0,002232	869,66	869,66	906,89	766,41	888,27	1,349	6,73	0,004463	1,324867	1,000967	1,000871	0,01899
23	-22	0,1544	0,09346	1,444	0,002619	906,89	906,89	947,18	789,69	927,03	1,345	6,79	0,005239	1,40358	1,001194	1,001081	0,023454
24	-21	0,1503	0,08531	1,4052	0,003051	947,18	947,18	990,57	815,42	968,87	1,342	6,85	0,006102	1,489621	1,001461	1,001328	0,028692
25	-20	0,1463	0,07751	1,3682	0,003527	990,57	990,57	1037,06	843,81	1013,81	1,338	6,92	0,007055	1,583679	1,001772	1,001616	0,034794

26	-19	0,1425	0,07007	1,3328	0,00405	1037,06	1037,06	1086,61	875,05	1061,84	1,334	6,98	0,0081	1,686454	1,002131	1,001951	0,041849
27	-18	0,1389	0,06298	1,2992	0,00462	1086,61	1086,61	1139,15	909,35	1112,88	1,331	7,04	0,009239	1,798644	1,002543	1,002337	0,049949
28	-17	0,1355	0,05626	1,2672	0,005236	1139,15	1139,15	1194,55	946,88	1166,85	1,328	7,10	0,010472	1,920926	1,003014	1,002778	0,059188
29	-16	0,1323	0,0499	1,237	0,005898	1194,55	1194,55	1252,65	987,83	1223,60	1,324	7,16	0,011796	2,053935	1,003547	1,00328	0,06966
30	-15	0,1293	0,04392	1,2086	0,006604	1252,65	1252,65	1313,24	1032,34	1282,95	1,321	7,22	0,013207	2,198239	1,004148	1,003847	0,081456
31	-14	0,1264	0,0383	1,1819	0,00735	1313,24	1313,24	1376,05	1080,55	1344,65	1,318	7,28	0,014701	2,354307	1,00482	1,004484	0,094663
32	-13	0,1237	0,03306	1,157	0,008134	1376,05	1376,05	1440,79	1132,56	1408,42	1,316	7,34	0,016268	2,522481	1,005568	1,005194	0,109363
33	-12	0,1213	0,0282	1,1339	0,00895	1440,79	1440,79	1507,09	1188,43	1473,94	1,313	7,39	0,0179	2,702938	1,006397	1,005983	0,125631
34	-11	0,119	0,02372	1,1127	0,009791	1507,09	1507,09	1574,58	1248,19	1540,83	1,311	7,44	0,019583	2,895655	1,007308	1,006853	0,143531
35	-10	0,1169	0,01962	1,0932	0,01065	1574,58	1574,58	1642,80	1311,80	1608,69	1,308	7,49	0,021301	3,10037	1,008305	1,007807	0,163114
36	-9	0,115	0,0159	1,0755	0,011518	1642,80	1642,80	1711,31	1379,19	1677,06	1,306	7,53	0,023037	3,316549	1,00939	1,008848	0,184415
37	-8	0,1133	0,01257	1,0597	0,012384	1711,31	1711,31	1779,61	1450,22	1745,46	1,304	7,57	0,024769	3,543357	1,010563	1,009976	0,207452
38	-7	0,1118	0,00963	1,0458	0,013237	1779,61	1779,61	1847,20	1524,69	1813,41	1,302	7,61	0,026474	3,779629	1,011824	1,011193	0,232221
39	-6	0,1105	0,00708	1,0336	0,014063	1847,20	1847,20	1913,55	1602,33	1880,38	1,301	7,65	0,028127	4,023858	1,013172	1,012498	0,258695
40	-5	0,1094	0,00492	1,0234	0,014849	1913,55	1913,55	1978,15	1682,80	1945,85	1,299	7,69	0,029699	4,274186	1,014604	1,013888	0,286821
41	-4	0,1085	0,00315	1,015	0,015581	1978,15	1978,15	2040,51	1765,68	2009,33	1,298	7,72	0,031162	4,528418	1,016116	1,01536	0,31652
42	-3	0,1078	0,00177	1,0084	0,016243	2040,51	2040,51	2100,12	1850,50	2070,32	1,296	7,75	0,032486	4,784042	1,017703	1,01691	0,347682
43	-2	0,1073	0,00079	1,0037	0,016821	2100,12	2100,12	2156,56	1936,71	2128,34	1,295	7,77	0,033641	5,038268	1,019357	1,01853	0,380168
44	-1	0,107	0,0002	1,0009	0,017299	2156,56	2156,56	2209,41	2023,71	2182,99	1,294	7,80	0,034599	5,288085	1,02107	1,020214	0,41381
45	0	0,1069	0	1	0,017666	2209,41	2209,41	2258,33	2110,85	2233,87	1,293	7,82	0,035331	5,53033	1,022832	1,021951	0,448408
46	1	0,107	0,0002	1,0009	0,017907	2258,33	2258,33	2303,01	2197,41	2280,67	1,293	7,84	0,035815	5,761771	1,024631	1,023731	0,483739
47	2	0,1073	0,00079	1,0037	0,018014	2303,01	2303,01	2343,24	2282,69	2323,12	1,292	7,85	0,036029	5,9792	1,026454	1,025543	0,519554
48	3	0,1078	0,00177	1,0084	0,017979	2343,24	2343,24	2378,85	2365,94	2361,04	1,291	7,87	0,035958	6,179526	1,028289	1,027372	0,555583
49	4	0,1085	0,00315	1,015	0,017797	2378,85	2378,85	2409,76	2446,43	2394,30	1,291	7,88	0,035594	6,359883	1,03012	1,029204	0,591541
50	5	0,1094	0,00492	1,0234	0,017467	2409,76	2409,76	2435,95	2523,44	2422,85	1,290	7,89	0,034934	6,517712	1,031932	1,031026	0,627135
51	6	0,1105	0,00708	1,0336	0,016991	2435,95	2435,95	2457,49	2596,31	2446,72	1,290	7,90	0,033983	6,650858	1,033711	1,032821	0,662069
52	7	0,1118	0,00963	1,0458	0,016376	2457,49	2457,49	2474,49	2664,40	2465,99	1,290	7,90	0,032753	6,757633	1,035441	1,034576	0,696052
53	8	0,1133	0,01257	1,0597	0,015633	2474,49	2474,49	2487,13	2727,17	2480,81	1,289	7,91	0,031266	6,836874	1,037109	1,036275	0,728805
54	9	0,115	0,0159	1,0755	0,014774	2487,13	2487,13	2495,63	2784,18	2491,38	1,289	7,91	0,029548	6,887972	1,038701	1,037905	0,76007
55	10	0,1169	0,01962	1,0932	0,013818	2495,63	2495,63	2500,27	2835,04	2497,95	1,289	7,92	0,027635	6,910889	1,040205	1,039453	0,789618
56	11	0,119	0,02372	1,1127	0,012783	2500,27	2500,27	2501,35	2879,52	2500,81	1,289	7,92	0,025567	6,906138	1,041612	1,040909	0,817253
57	12	0,1213	0,0282	1,1339	0,011694	2501,35	2501,35	2499,18	2917,49	2500,27	1,289	7,92	0,023387	6,874758	1,042914	1,042263	0,84282
58	13	0,1237	0,03306	1,157	0,010571	2499,18	2499,18	2494,10	2948,91	2496,64	1,289	7,91	0,021143	6,818255	1,044105	1,04351	0,866208

59	14	0,1264	0,0383	1,1819	0,00944	2494,10	2494,10	2486,45	2973,88	2490,28	1,289	7,91	0,018881	6,738533	1,045182	1,044643	0,88735
60	15	0,1293	0,04392	1,2086	0,008323	2486,45	2486,45	2476,55	2992,62	2481,50	1,289	7,91	0,016647	6,637818	1,046143	1,045662	0,906231
61	16	0,1323	0,0499	1,237	0,007242	2476,552	2476,552	2464,722	3005,40	2470,637	1,290	7,91	0,014483	6,518565	1,046991	1,046567	0,922878
62	17	0,1355	0,05626	1,2672	0,006214	2464,72	2464,72	2451,26	3012,62	2457,99	1,290	7,90	0,012428	6,383371	1,047728	1,047359	0,937361
63	18	0,1389	0,06298	1,2992	0,005256	2451,26	2451,26	2436,44	3014,71	2443,85	1,290	7,90	0,010512	6,234883	1,048361	1,048044	0,949789
64	19	0,1425	0,07007	1,3328	0,004379	2436,44	2436,44	2420,50	3012,18	2428,47	1,290	7,89	0,008759	6,075719	1,048896	1,048628	0,960301
65	20	0,1463	0,07751	1,3682	0,003593	2420,50	2420,50	2403,68	3005,54	2412,09	1,290	7,89	0,007186	5,908397	1,049342	1,049119	0,96906
66	21	0,1503	0,08531	1,4052	0,0029	2403,68	2403,68	2386,15	2995,33	2394,92	1,291	7,88	0,0058	5,735273	1,049708	1,049525	0,976245
67	22	0,1544	0,09346	1,444	0,002302	2386,15	2386,15	2368,10	2982,07	2377,13	1,291	7,87	0,004604	5,558499	1,050003	1,049856	0,982046
68	23	0,1587	0,10197	1,4843	0,001795	2368,10	2368,10	2349,67	2966,26	2358,89	1,291	7,87	0,003591	5,37999	1,050238	1,05012	0,986649
69	24	0,1632	0,11081	1,5263	0,001375	2349,67	2349,67	2330,97	2948,39	2340,32	1,291	7,86	0,002751	5,201411	1,05042	1,050329	0,99024
70	25	0,1679	0,11999	1,57	0,001034	2330,97	2330,97	2312,10	2928,87	2321,53	1,292	7,86	0,002067	5,024169	1,050561	1,050491	0,992991
71	26	0,1727	0,12951	1,6152	0,000762	2312,10	2312,10	2293,15	2908,08	2302,62	1,292	7,85	0,001524	4,849428	1,050666	1,050613	0,995058
72	27	0,1777	0,13936	1,662	0,00055	2293,15	2293,15	2274,20	2886,36	2283,67	1,292	7,84	0,001101	4,678115	1,050743	1,050705	0,996582
73	28	0,1829	0,14954	1,7103	0,000389	2274,20	2274,20	2255,30	2863,98	2264,75	1,293	7,84	0,000779	4,510951	1,050799	1,050771	0,997683
74	29	0,1882	0,16004	1,7602	0,000269	2255,30	2255,30	2236,50	2841,18	2245,90	1,293	7,83	0,000539	4,348469	1,050839	1,050819	0,998462
75	30	0,1937	0,17085	1,8115	0,000182	2236,50	2236,50	2217,82	2818,13	2227,16	1,293	7,82	0,000364	4,191045	1,050867	1,050853	0,999

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)

Таблица Б1 - расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня.

$\varphi_{кв}$ , град	$\varphi_{кв}$ , рад	$S_X$ , мм	$V_X$ , м/с	$W_{X1}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_{X2}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_X$ , м/с <sup>2</sup>
0	0	0	0	14018,35	4035,5849	18053,9
10	0,1745	0,7422	5,144	13805,38	3792,2093	17597,6
20	0,3491	2,9315	10,03	13172,94	3091,4374	16264,4
30	0,5236	6,4585	14,42	12140,25	2017,7924	14158
40	0,6981	11,15	18,11	10738,68	700,77196	11439,4
50	0,8727	16,784	20,95	9010,82	-700,772	8310,05
60	1,0472	23,102	22,87	7009,174	-2017,792	4991,38
70	1,2217	29,833	23,82	4794,557	-3091,437	1703,12
80	1,3963	36,706	23,87	2434,26	-3792,209	-1357,95
90	1,5708	43,47	23,08	8,59E-13	-4035,585	-4035,58
100	1,7453	49,903	21,59	-2434,26	-3792,209	-6226,47
110	1,9199	55,827	19,55	-4794,56	-3091,437	-7885,99
120	2,0944	61,102	17,11	-7009,17	-2017,792	-9026,97
130	2,2689	65,636	14,41	-9010,82	-700,772	-9711,59
140	2,4435	69,37	11,56	-10738,7	700,77196	-10037,9
150	2,618	72,276	8,663	-12140,2	2017,7924	-10122,5
160	2,7925	74,348	5,758	-13172,9	3091,4374	-10081,5
170	2,9671	75,588	2,872	-13805,4	3792,2093	-10013,2
180	3,1416	76	2E-15	-14018,3	4035,5849	-9982,76
190	3,3161	75,588	-2,872	-13805,4	3792,2093	-10013,2
200	3,4907	74,348	-5,758	-13172,9	3091,4374	-10081,5
210	3,6652	72,276	-8,663	-12140,2	2017,7924	-10122,5
220	3,8397	69,37	-11,56	-10738,7	700,77196	-10037,9
230	4,0143	65,636	-14,41	-9010,82	-700,772	-9711,59
240	4,1888	61,102	-17,11	-7009,17	-2017,792	-9026,97
250	4,3633	55,827	-19,55	-4794,56	-3091,437	-7885,99
260	4,5379	49,903	-21,59	-2434,26	-3792,209	-6226,47
270	4,7124	43,47	-23,08	-2,6E-12	-4035,585	-4035,58
280	4,8869	36,706	-23,87	2434,26	-3792,209	-1357,95
290	5,0615	29,833	-23,82	4794,557	-3091,437	1703,12
300	5,236	23,102	-22,87	7009,174	-2017,792	4991,38
310	5,4105	16,784	-20,95	9010,82	-700,772	8310,05
320	5,5851	11,15	-18,11	10738,68	700,77196	11439,4
330	5,7596	6,4585	-14,42	12140,25	2017,7924	14158
340	5,9341	2,9315	-10,03	13172,94	3091,4374	16264,4
350	6,1087	0,7422	-5,144	13805,38	3792,2093	17597,6
360	6,2832	3E-31	-7E-15	14018,35	4035,5849	18053,9
370	6,4577	0,7422	5,144	13805,38	3792,2093	17597,6
380	6,6323	2,9315	10,03	13172,94	3091,4374	16264,4
390	6,8068	6,4585	14,42	12140,25	2017,7924	14158
400	6,9813	11,15	18,11	10738,68	700,77196	11439,4
410	7,1558	16,784	20,95	9010,82	-700,772	8310,05
420	7,3304	23,102	22,87	7009,174	-2017,792	4991,38
430	7,5049	29,833	23,82	4794,557	-3091,437	1703,12
440	7,6794	36,706	23,87	2434,26	-3792,209	-1357,95
450	7,854	43,47	23,08	4,29E-12	-4035,585	-4035,58
460	8,0285	49,903	21,59	-2434,26	-3792,209	-6226,47
470	8,203	55,827	19,55	-4794,56	-3091,437	-7885,99

480	8,3776	61,102	17,11	-7009,17	-2017,792	-9026,97
490	8,5521	65,636	14,41	-9010,82	-700,772	-9711,59
500	8,7266	69,37	11,56	-10738,7	700,77196	-10037,9
510	8,9012	72,276	8,663	-12140,2	2017,7924	-10122,5
520	9,0757	74,348	5,758	-13172,9	3091,4374	-10081,5
530	9,2502	75,588	2,872	-13805,4	3792,2093	-10013,2
540	9,4248	76	6E-15	-14018,3	4035,5849	-9982,76
550	9,5993	75,588	-2,872	-13805,4	3792,2093	-10013,2
560	9,7738	74,348	-5,758	-13172,9	3091,4374	-10081,5
570	9,9484	72,276	-8,663	-12140,2	2017,7924	-10122,5
580	10,123	69,37	-11,56	-10738,7	700,77196	-10037,9
590	10,297	65,636	-14,41	-9010,82	-700,772	-9711,59
600	10,472	61,102	-17,11	-7009,17	-2017,792	-9026,97
610	10,647	55,827	-19,55	-4794,56	-3091,437	-7885,99
620	10,821	49,903	-21,59	-2434,26	-3792,209	-6226,47
630	10,996	43,47	-23,08	-6E-12	-4035,585	-4035,58
640	11,17	36,706	-23,87	2434,26	-3792,209	-1357,95
650	11,345	29,833	-23,82	4794,557	-3091,437	1703,12
660	11,519	23,102	-22,87	7009,174	-2017,792	4991,38
670	11,694	16,784	-20,95	9010,82	-700,772	8310,05
680	11,868	11,15	-18,11	10738,68	700,77196	11439,4
690	12,043	6,4585	-14,42	12140,25	2017,7924	14158
700	12,217	2,9315	-10,03	13172,94	3091,4374	16264,4
710	12,392	0,7422	-5,144	13805,38	3792,2093	17597,6
720	12,566	1E-30	-1E-14	14018,35	4035,5849	18053,9

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**(обязательное)**

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

$\varphi^\circ$	$\Delta p_r$ , Мпа	$W$ , м/с <sup>2</sup>	$p_j$ , МПа	$p$ , Мпа	$tg\beta$	$p_N$ , МПа	$1/\cos\beta$	$p_s$ , Мпа	$\cos(\beta+\varphi)/$ $\cos\beta$	$p_k$ , Мпа	$\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$	$p_T$ , Мпа	$T$ , кН	$M_{кр.ц}$ , Нм
0,0042	21539	-2,542	-2,5374	0	0	1	-2,537	1	-2,537	0	0	0	0	0
-0,0058	20988	-2,477	-2,4824	0,0521	-0,129	1,0014	-2,486	0,975767	-2,422	0,224914	-0,55833	-3,47344	-167,42	0,05201
-0,0158	19379	-2,287	-2,3026	0,1029	-0,237	1,0053	-2,315	0,904474	-2,083	0,438741	-1,01022	-6,28475	-302,925	0,102573
-0,0178	16838	-1,987	-2,0047	0,1514	-0,303	1,0113	-2,027	0,790277	-1,584	0,631072	-1,26514	-7,87061	-379,363	0,150254
-0,0208	13562	-1,6	-1,6212	0,1961	-0,318	1,0189	-1,652	0,639878	-1,037	0,79287	-1,28537	-7,99645	-385,429	0,193645
-0,0238	9796	-1,156	-1,1798	0,2355	-0,278	1,027	-1,212	0,462126	-0,545	0,917162	-1,08205	-6,73156	-324,461	0,231397
-0,0268	5811	-0,686	-0,7125	0,2683	-0,191	1,0348	-0,737	0,267354	-0,19	0,999645	-0,71221	-4,43073	-213,561	0,262266
-0,0298	1872	-0,221	-0,2507	0,2929	-0,073	1,0412	-0,261	0,066479	-0,017	1,039078	-0,26054	-1,62084	-78,1244	0,285174
-0,0318	-1780	0,21	0,1782	0,3082	0,0549	1,0454	0,1863	-0,13008	-0,023	1,037314	0,184851	1,149986	55,42932	0,299278
-0,0318	-4957	0,5849	0,5531	0,3134	0,1734	1,0469	0,579	-0,31342	-0,173	0,998899	0,552484	3,437082	165,6673	0,304042
-0,0194	-7535	0,8892	0,8697	0,3082	0,2681	1,0454	0,9093	-0,47701	-0,415	0,930268	0,809097	5,033509	242,6151	0,299278
-0,0194	-9464	1,1167	1,0973	0,2929	0,3214	1,0412	1,1425	-0,61698	-0,677	0,838712	0,920335	5,725531	275,9706	0,285174
-0,0194	-10762	1,2699	1,2505	0,2683	0,3355	1,0348	1,294	-0,73204	-0,915	0,731358	0,914534	5,689444	274,2312	0,262266
-0,0194	-11508	1,358	1,3386	0,2355	0,3153	1,027	1,3747	-0,82298	-1,102	0,614368	0,822375	5,116112	246,5966	0,231397
-0,0184	-11827	1,3956	1,3772	0,1961	0,27	1,0189	1,4032	-0,89194	-1,228	0,492477	0,678246	4,219466	203,3783	0,193645
-0,0174	-11865	1,4	1,3826	0,1514	0,2093	1,0113	1,3983	-0,94166	-1,302	0,368864	0,509991	3,172723	152,9252	0,150254
-0,0164	-11765	1,3882	1,3718	0,1029	0,1412	1,0053	1,3791	-0,97488	-1,337	0,24529	0,336495	2,09338	100,9009	0,102573
-0,0144	-11650	1,3747	1,3603	0,0521	0,0708	1,0014	1,3622	-0,99385	-1,352	0,122382	0,166477	1,035679	49,91974	0,05201
-0,0124	-11602	1,3691	1,3566	4E-17	5E-17	1	1,3566	-1	-1,357	1,23E-16	1,66E-16	1,03E-15	4,98E-14	3,67E-17
-0,0104	-11649	1,3746	1,3642	-0,052	-0,071	1,0014	1,366	-0,99385	-1,356	-0,12238	-0,16695	-1,03861	-50,0611	-0,05201
-0,0084	-11762	1,388	1,3795	-0,103	-0,142	1,0053	1,3868	-0,97488	-1,345	-0,24529	-0,33838	-2,10514	-101,468	-0,10257
-0,0064	-11861	1,3996	1,3932	-0,151	-0,211	1,0113	1,4089	-0,94166	-1,312	-0,36886	-0,51388	-3,19695	-154,093	-0,15025
-0,0044	-11822	1,395	1,3906	-0,196	-0,273	1,0189	1,4169	-0,89194	-1,24	-0,49248	-0,68485	-4,26055	-205,358	-0,19364
-0,0036	-11502	1,3573	1,3536	-0,236	-0,319	1,027	1,3902	-0,82298	-1,114	-0,61437	-0,83163	-5,17372	-249,373	-0,2314
0,0051	-10754	1,269	1,2741	-0,268	-0,342	1,0348	1,3184	-0,73204	-0,933	-0,73136	-0,93181	-5,79691	-279,411	-0,26227
0,0171	-9455	1,1157	1,1328	-0,293	-0,332	1,0412	1,1795	-0,61698	-0,699	-0,83871	-0,95008	-5,91059	-284,89	-0,28517

0,0337	-7525	0,888	0,9217	-0,308	-0,284	1,0454	0,9636	-0,47701	-0,44	-0,93027	-0,85743	-5,33416	-257,107	-0,29928
0,0571	-4946	0,5836	0,6407	-0,313	-0,201	1,0469	0,6707	-0,31342	-0,201	-0,9989	-0,63995	-3,9812	-191,894	-0,30404
0,0905	-1767	0,2085	0,2991	-0,308	-0,092	1,0454	0,3127	-0,13008	-0,039	-1,03731	-0,31024	-1,93005	-93,0286	-0,29928
0,1397	1886	-0,223	-0,0829	-0,293	0,0243	1,0412	-0,086	0,066479	-0,006	-1,03908	0,08611	0,535701	25,82079	-0,28517
0,2139	5826	-0,687	-0,4735	-0,268	0,127	1,0348	-0,49	0,267354	-0,127	-0,99964	0,473353	2,944795	141,9391	-0,26227
0,3293	9813	-1,158	-0,8286	-0,236	0,1952	1,027	-0,851	0,462126	-0,383	-0,91716	0,75994	4,727695	227,8749	-0,2314
0,5128	13580	-1,602	-1,0897	-0,196	0,2136	1,0189	-1,11	0,639878	-0,697	-0,79287	0,863952	5,374765	259,0637	-0,19364
0,8277	16857	-1,989	-1,1614	-0,151	0,1758	1,0113	-1,175	0,790277	-0,918	-0,63107	0,732933	4,55968	219,7766	-0,15025
0,8717	17148	-2,023	-1,1518	-0,147	0,169	1,0106	-1,164	0,803455	-0,925	-0,61308	0,706131	4,392937	211,7396	-0,14566
0,9191	17432	-2,057	-1,1378	-0,142	0,1615	1,01	-1,149	0,816261	-0,929	-0,59478	0,67673	4,210032	202,9235	-0,14102
0,9705	17707	-2,089	-1,1189	-0,137	0,1535	1,0093	-1,129	0,828688	-0,927	-0,5762	0,644735	4,010989	193,3297	-0,13634
1,0262	17975	-2,121	-1,0948	-0,132	0,1449	1,0087	-1,104	0,840729	-0,92	-0,55734	0,610168	3,795939	182,9643	-0,13162
1,0868	18234	-2,152	-1,0648	-0,128	0,1358	1,0081	-1,073	0,852376	-0,908	-0,5382	0,57307	3,565147	171,8401	-0,12686
1,1528	18485	-2,181	-1,0284	-0,123	0,1262	1,0075	-1,036	0,863622	-0,888	-0,5188	0,533511	3,319045	159,9779	-0,12207
1,2249	18727	-2,21	-0,9849	-0,118	0,116	1,0069	-0,992	0,874462	-0,861	-0,49914	0,491594	3,058273	147,4087	-0,11725
1,3036	18960	-2,237	-0,9337	-0,113	0,1054	1,0063	-0,94	0,884888	-0,826	-0,47924	0,447462	2,783722	134,1754	-0,11239
1,3896	19184	-2,264	-0,8741	-0,108	0,0943	1,0058	-0,879	0,894894	-0,782	-0,4591	0,401306	2,496579	120,3351	-0,10749
1,4837	19399	-2,289	-0,8054	-0,103	0,0829	1,0053	-0,81	0,904474	-0,728	-0,43874	0,353371	2,198373	105,9616	-0,10257
1,5865	19605	-2,313	-0,7269	-0,098	0,0712	1,0048	-0,73	0,913624	-0,664	-0,41816	0,303967	1,891022	91,14727	-0,09762
1,6986	19801	-2,337	-0,6379	-0,093	0,0593	1,0043	-0,641	0,922337	-0,588	-0,39738	0,253472	1,576885	76,00587	-0,09265
1,8209	19987	-2,359	-0,5376	-0,088	0,0472	1,0038	-0,54	0,930608	-0,5	-0,3764	0,202342	1,258798	60,67406	-0,08764
1,9539	20164	-2,379	-0,4254	-0,083	0,0352	1,0034	-0,427	0,938433	-0,399	-0,35523	0,151116	0,940112	45,31342	-0,08261
2,0982	20330	-2,399	-0,3008	-0,078	0,0234	1,003	-0,302	0,945806	-0,284	-0,33389	0,100419	0,624721	30,11154	-0,07756
2,2543	20487	-2,417	-0,1632	-0,073	0,0118	1,0026	-0,164	0,952725	-0,155	-0,31238	0,050966	0,317065	15,28252	-0,07249
2,4225	20633	-2,435	-0,0122	-0,067	0,0008	1,0023	-0,012	0,959184	-0,012	-0,29072	0,003557	0,022127	1,06651	-0,0674
2,6029	20769	-2,451	0,1522	-0,062	-0,009	1,0019	0,1525	0,965179	0,147	-0,26891	-0,04093	-0,2546	-12,2719	-0,06228
2,7957	20894	-2,466	0,3301	-0,057	-0,019	1,0016	0,3306	0,970708	0,32	-0,24698	-0,08153	-0,5072	-24,4469	-0,05716
3,0004	21009	-2,479	0,5213	-0,052	-0,027	1,0014	0,522	0,975767	0,509	-0,22491	-0,11724	-0,72937	-35,1556	-0,05201
3,2165	21114	-2,491	0,7252	-0,047	-0,034	1,0011	0,7259	0,980353	0,711	-0,20274	-0,14702	-0,91462	-44,0848	-0,04685
3,4434	21207	-2,502	0,9409	-0,042	-0,039	1,0009	0,9417	0,984464	0,926	-0,18047	-0,16981	-1,0564	-50,9186	-0,04168
3,6796	21290	-2,512	1,1674	-0,037	-0,043	1,0007	1,1682	0,988097	1,154	-0,15811	-0,18458	-1,14831	-55,3483	-0,03649
3,9239	21361	-2,521	1,4032	-0,031	-0,044	1,0005	1,4039	0,991249	1,391	-0,13567	-0,19037	-1,1843	-57,0833	-0,0313

4,1742	21422	-2,528	1,6464	-0,026	-0,043	1,0003	1,6469	0,99392	1,636	-0,11316	-0,1863	-1,15899	-55,8632	-0,0261
4,4284	21472	-2,534	1,8947	-0,021	-0,04	1,0002	1,8951	0,996107	1,887	-0,09059	-0,17165	-1,06785	-51,4703	-0,02089
4,6840	21511	-2,538	2,1457	-0,016	-0,034	1,0001	2,146	0,997809	2,141	-0,06798	-0,14588	-0,90753	-43,7428	-0,01567
4,9383	21539	-2,542	2,3967	-0,01	-0,025	1,0001	2,3968	0,999026	2,394	-0,04534	-0,10867	-0,67606	-32,5859	-0,01045
5,1881	21555	-2,544	2,6445	-0,005	-0,014	1	2,6446	0,999757	2,644	-0,02268	-0,05997	-0,37308	-17,9823	-0,00522
5,4303	21561	-2,544	2,8861	-7E-17	-2E-16	1	2,8861	1	2,886	-2,5E-16	-7,1E-16	-4,4E-15	-2,1E-13	-7,3E-17
5,6618	21556	-2,544	3,1182	0,0052	0,0163	1	3,1183	0,999757	3,117	0,022677	0,07071	0,439899	21,20313	0,005225
5,8792	21539	-2,542	3,3376	0,0104	0,0349	1,0001	3,3378	0,999026	3,334	0,045342	0,151333	0,941463	45,37852	0,010448
6,0795	21511	-2,538	3,5412	0,0157	0,0555	1,0001	3,5416	0,997809	3,533	0,067985	0,240746	1,497717	72,18998	0,015669
6,2599	21473	-2,534	3,7261	0,0209	0,0778	1,0002	3,7269	0,996107	3,712	0,090594	0,337562	2,100023	101,2211	0,020885
6,4177	21423	-2,528	3,8898	0,0261	0,1015	1,0003	3,8911	0,99392	3,866	0,113158	0,440163	2,738313	131,9867	0,026096
6,5509	21362	-2,521	4,0301	0,0313	0,1262	1,0005	4,0321	0,991249	3,995	0,135666	0,54675	3,401406	163,9478	0,031299
6,6576	21291	-2,512	4,1453	0,0365	0,1513	1,0007	4,1481	0,988097	4,096	0,158107	0,655407	4,077379	196,5297	0,036493
6,7369	21208	-2,503	4,2343	0,0417	0,1766	1,0009	4,238	0,984464	4,169	0,180469	0,764165	4,753975	229,1416	0,041678
6,7880	21115	-2,492	4,2964	0,0469	0,2014	1,0011	4,3012	0,980353	4,212	0,202742	0,871068	5,419036	261,1975	0,04685
6,8109	21011	-2,479	4,3316	0,0521	0,2255	1,0014	4,3375	0,975767	4,227	0,224914	0,974247	6,060925	292,1366	0,05201
6,8061	20896	-2,466	4,3404	0,0572	0,2483	1,0016	4,3475	0,970708	4,213	0,246975	1,071977	6,66892	321,442	0,057155
6,7748	20771	-2,451	4,3238	0,0624	0,2697	1,0019	4,3322	0,965179	4,173	0,268914	1,162738	7,233553	348,6573	0,062285
6,7183	20635	-2,435	4,2833	0,0675	0,2891	1,0023	4,2931	0,959184	4,109	0,290719	1,245251	7,746883	373,3997	0,067397
6,6385	20489	-2,418	4,2209	0,0726	0,3065	1,0026	4,232	0,952725	4,021	0,312381	1,318518	8,202685	395,3694	0,07249
6,5378	20332	-2,399	4,1386	0,0777	0,3216	1,003	4,1511	0,945806	3,914	0,333888	1,381829	8,596554	414,3539	0,077563
6,4186	20166	-2,38	4,039	0,0828	0,3344	1,0034	4,0528	0,938433	3,79	0,35523	1,434771	8,925914	430,229	0,082614
6,2834	19989	-2,359	3,9246	0,0879	0,3448	1,0038	3,9397	0,930608	3,652	0,376397	1,477213	9,189951	442,9556	0,087642
6,1349	19803	-2,337	3,7981	0,0929	0,3529	1,0043	3,8144	0,922337	3,503	0,397378	1,509284	9,389468	452,5724	0,092646
5,9757	19607	-2,314	3,6621	0,0979	0,3586	1,0048	3,6796	0,913624	3,346	0,418162	1,531341	9,526687	459,1863	0,097623
5,8084	19402	-2,289	3,519	0,1029	0,3622	1,0053	3,5375	0,904474	3,183	0,438741	1,543931	9,605008	462,9614	0,102573
5,6353	19187	-2,264	3,3712	0,1079	0,3638	1,0058	3,3908	0,894894	3,017	0,459104	1,547746	9,628746	464,1056	0,107495
5,4585	18963	-2,238	3,2209	0,1129	0,3635	1,0063	3,2413	0,884888	2,85	0,47924	1,543587	9,602872	462,8584	0,112386
5,2800	18730	-2,21	3,0699	0,1178	0,3616	1,0069	3,0911	0,874462	2,685	0,499141	1,532316	9,532755	459,4788	0,117245
5,1014	18488	-2,182	2,9199	0,1227	0,3582	1,0075	2,9417	0,863622	2,522	0,518797	1,514825	9,423939	454,2339	0,122071
4,9242	18237	-2,152	2,7722	0,1275	0,3536	1,0081	2,7946	0,852376	2,363	0,538198	1,492001	9,281949	447,3899	0,126863
4,6191	17978	-2,121	2,4978	0,1324	0,3307	1,0087	2,5195	0,840729	2,1	0,557336	1,392091	8,660395	417,431	0,131619

4,4632	17710	-2,09	2,3734	0,1372	0,3256	1,0093	2,3955	0,828688	1,967	0,576201	1,367561	8,507786	410,0753	0,136337
4,3119	17435	-2,057	2,2546	0,142	0,32	1,01	2,2771	0,816261	1,84	0,594784	1,340987	8,342468	402,107	0,141017
4,1653	17152	-2,024	2,1414	0,1467	0,3141	1,0106	2,1641	0,803455	1,72	0,613077	1,312815	8,167203	393,6592	0,145656
4,0234	16861	-1,99	2,0338	0,1514	0,3079	1,0113	2,0568	0,790277	1,607	0,631072	1,283459	7,984581	384,8568	0,150254
3,8862	16563	-1,954	1,9319	0,156	0,3015	1,012	1,9551	0,776735	1,501	0,648759	1,253309	7,797011	375,8159	0,154809
3,7539	16257	-1,918	1,8356	0,1607	0,2949	1,0127	1,859	0,762838	1,4	0,666131	1,222721	7,606721	366,6439	0,15932
3,6263	15945	-1,881	1,7448	0,1653	0,2883	1,0135	1,7683	0,748593	1,306	0,68318	1,192025	7,415757	357,4395	0,163785
3,5034	15626	-1,844	1,6596	0,1698	0,2818	1,0142	1,6831	0,734009	1,218	0,699899	1,161521	7,225984	348,2924	0,168203
3,3851	15300	-1,805	1,5797	0,1743	0,2753	1,015	1,6033	0,719094	1,136	0,716279	1,131479	7,039092	339,2842	0,172572
3,2713	14969	-1,766	1,505	0,1787	0,269	1,0157	1,5287	0,703857	1,059	0,732315	1,102145	6,8566	330,4881	0,176892
3,1619	14631	-1,726	1,4355	0,1831	0,2629	1,0165	1,4592	0,688308	0,988	0,747998	1,073736	6,679864	321,9694	0,18116
3,0568	14288	-1,686	1,3709	0,1875	0,257	1,0173	1,3946	0,672456	0,922	0,763322	1,046445	6,510082	313,7859	0,185376
2,9559	13939	-1,645	1,3111	0,1918	0,2515	1,0181	1,3348	0,656309	0,861	0,778282	1,020441	6,348304	305,9883	0,189538
2,8590	13585	-1,603	1,256	0,1961	0,2463	1,0189	1,2797	0,639878	0,804	0,79287	0,995869	6,195439	298,6201	0,193645
2,0826	9819	-1,159	0,924	0,2355	0,2176	1,027	0,9489	0,462126	0,427	0,917162	0,847415	5,271885	254,1049	0,231397
1,5697	5833	-0,688	0,8814	0,2683	0,2365	1,0348	0,9121	0,267354	0,236	0,999645	0,881134	5,481657	264,2159	0,262266
1,2257	1895	-0,224	1,0021	0,2929	0,2935	1,0412	1,0434	0,066479	0,067	1,039078	1,041246	6,477738	312,227	0,285174
0,9894	-1757	0,2074	1,1968	0,3082	0,3689	1,0454	1,2512	-0,13008	-0,156	1,037314	1,24146	7,723299	372,263	0,299278
0,8235	-4934	0,5823	1,4058	0,3134	0,4406	1,0469	1,4717	-0,31342	-0,441	0,998899	1,404225	8,735883	421,0696	0,304042
0,7047	-7513	0,8865	1,5912	0,3082	0,4904	1,0454	1,6635	-0,47701	-0,759	0,930268	1,480227	9,208699	443,8593	0,299278
0,6182	-9441	1,1141	1,7323	0,2929	0,5074	1,0412	1,8037	-0,61698	-1,069	0,838712	1,452928	9,038867	435,6734	0,285174
0,5548	-10739	1,2672	1,822	0,2683	0,4888	1,0348	1,8854	-0,73204	-1,334	0,731358	1,332566	8,290082	399,582	0,262266
0,5082	-11486	1,3553	1,8635	0,2355	0,4389	1,027	1,9138	-0,82298	-1,534	0,614368	1,144885	7,122491	343,3041	0,231397
0,4742	-11805	1,393	1,8672	0,1961	0,3661	1,0189	1,9024	-0,89194	-1,665	0,492477	0,919539	5,720583	275,7321	0,193645
0,3742	-11842	1,3974	1,7716	0,1514	0,2682	1,0113	1,7916	-0,94166	-1,668	0,368864	0,653463	4,065288	195,9469	0,150254
0,2742	-11742	1,3856	1,6598	0,1029	0,1708	1,0053	1,6685	-0,97488	-1,618	0,24529	0,407128	2,532801	122,081	0,102573
0,2642	-11628	1,3721	1,6363	0,0521	0,0852	1,0014	1,6385	-0,99385	-1,626	0,122382	0,20025	1,245783	60,04674	0,05201
0,1642	-11580	1,3664	1,5306	1E-16	2E-16	1	1,5306	-1	-1,531	3,68E-16	5,63E-16	3,5E-15	1,69E-13	1,1E-16
0,1442	-11627	1,3719	1,5161	-0,052	-0,079	1,0014	1,5182	-0,99385	-1,507	-0,12238	-0,18555	-1,15431	-55,6377	-0,05201
0,1242	-11740	1,3853	1,5095	-0,103	-0,155	1,0053	1,5174	-0,97488	-1,472	-0,24529	-0,37026	-2,30346	-111,027	-0,10257
0,1042	-11838	1,3969	1,5011	-0,151	-0,227	1,0113	1,5181	-0,94166	-1,414	-0,36886	-0,55371	-3,4447	-166,034	-0,15025
0,0842	-11800	1,3924	1,4766	-0,196	-0,29	1,0189	1,5044	-0,89194	-1,317	-0,49248	-0,72719	-4,52392	-218,053	-0,19364

0,0642	-11480	1,3546	1,4188	-0,236	-0,334	1,027	1,4571	-0,82298	-1,168	-0,61437	-0,87166	-5,42275	-261,376	-0,2314
0,0442	-10732	1,2664	1,3105	-0,268	-0,352	1,0348	1,3561	-0,73204	-0,959	-0,73136	-0,95847	-5,9628	-287,407	-0,26227
0,0242	-9433	1,1131	1,1373	-0,293	-0,333	1,0412	1,1841	-0,61698	-0,702	-0,83871	-0,95383	-5,93389	-286,014	-0,28517
0,0042	-7503	0,8854	0,8895	-0,308	-0,274	1,0454	0,93	-0,47701	-0,424	-0,93027	-0,8275	-5,14802	-248,135	-0,29928
0,0042	-4923	0,5809	0,5851	-0,313	-0,183	1,0469	0,6126	-0,31342	-0,183	-0,9989	-0,58448	-3,63614	-175,262	-0,30404
0,0042	-1745	0,2059	0,2101	-0,308	-0,065	1,0454	0,2196	-0,13008	-0,027	-1,03731	-0,21793	-1,35575	-65,3471	-0,29928
0,0042	1908	-0,225	-0,221	-0,293	0,0647	1,0412	-0,23	0,066479	-0,015	-1,03908	0,229637	1,428602	68,8586	-0,28517
0,0042	5848	-0,69	-0,6859	-0,268	0,184	1,0348	-0,71	0,267354	-0,183	-0,99964	0,685623	4,265355	205,5901	-0,26227
0,0042	9835	-1,161	-1,1563	-0,236	0,2724	1,027	-1,188	0,462126	-0,534	-0,91716	1,060543	6,597784	318,0132	-0,2314
0,0042	13602	-1,605	-1,6009	-0,196	0,3139	1,0189	-1,631	0,639878	-1,024	-0,79287	1,269272	7,89632	380,6026	-0,19364
0,0042	16879	-1,992	-1,9876	-0,151	0,3009	1,0113	-2,01	0,790277	-1,571	-0,63107	1,254315	7,803267	376,1175	-0,15025
0,0042	19421	-2,292	-2,2875	-0,103	0,2355	1,0053	-2,3	0,904474	-2,069	-0,43874	1,003641	6,24379	300,9507	-0,10257
0,0042	21032	-2,482	-2,4775	-0,052	0,129	1,0014	-2,481	0,975767	-2,418	-0,22491	0,557235	3,46664	167,092	-0,05201
0,0042	21583	-2,547	-2,5427	-1E-16	4E-16	1	-2,543	1	-2,543	-4,9E-16	1,25E-15	7,75E-15	3,74E-13	-1,5E-16

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

$\varphi^\circ$	Цилиндры								$M_{кр.ц},$ Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	
0	0	0	180	2E-14	360	6,2E-14	540	-2E-13	0
10	10	-55,14	190	-17,2	370	-20,562	550	210,27	117,36
20	20	-100,2	200	-34,78	380	-40,548	560	342,23	166,67
30	30	-126	210	-52,58	390	-59,805	570	315,79	77,4
40	40	-128,9	220	-69,67	400	-77,382	580	266,95	-8,985
50	50	-109,8	230	-83,99	410	-91,341	590	225,47	-59,67
60	60	-74,16	240	-93,82	420	-98,857	600	203,21	-63,63
70	70	-30,09	250	-95,64	430	-96,687	610	197,03	-25,39
80	80	13,938	260	-86,86	440	-82,043	620	198,75	43,784
90	90	50,934	270	-66,46	450	-57,222	630	200,32	127,57
100	100	78,194	280	-36,08	460	-20,453	640	196,24	217,9
110	110	90,262	290	-0,573	470	23,9374	650	184,21	297,84
120	120	90,666	300	32,344	480	68,7767	660	164,61	356,4
130	130	82,277	310	53,602	490	105,351	670	139,47	380,7
140	140	68,448	320	55,549	500	125,454	680	111,34	360,79
150	150	51,861	330	33,568	510	123,602	690	77,442	286,47
160	160	34,432	340	-13,68	520	98,7186	700	47,072	166,54
170	170	17,117	350	-61,9	530	54,7551	710	23,168	33,136
180	180	2E-14	360	-2E-13	540	1,2E-13	720	6E-14	3E-14

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1- Силы, действующих на шатунную шейку коленчатого вала.

φ, град	K, Н	T, Н	R <sub>к</sub> , Н	R <sub>ш.ш.</sub> , Н	K <sub>рк</sub> , Н	R <sub>к</sub> , Н
0	0	-6,6313922	-14,0767	14,0767	-26,0576	26,05765
10	-1,451171	-6,3537808	-13,7991	13,8752	-25,78	25,82085
20	-2,637842	-5,4931673	-12,9385	13,2046	-24,9194	25,05865
30	-3,315968	-4,2023822	-11,6477	12,1105	-23,6286	23,86018
40	-3,391855	-2,7797862	-10,2251	10,7730	-22,206	22,46359
50	-2,889676	-1,4889161	-8,93422	9,3899	-20,9152	21,11385
60	-1,951641	-0,5435605	-7,98887	8,2238	-19,9698	20,06496
70	-0,791791	-0,0596036	-7,50491	7,5466	-19,4859	19,50194
80	0,366799	-0,0415938	-7,4869	7,4959	-19,4679	19,47131
90	1,340378	-0,4029233	-7,84823	7,9619	-19,8292	19,87443
100	2,057741	-1,0245855	-8,46989	8,7163	-20,4508	20,5541
110	2,375308	-1,7065219	-9,15183	9,4551	-21,1328	21,26585
120	2,385943	-2,3394844	-9,78479	10,0715	-21,7657	21,89612
130	2,165192	-2,8463452	-10,2917	10,5169	-22,2726	22,3776
140	1,801254	-3,2050443	-10,6503	10,8016	-22,6313	22,70287
150	1,364761	-3,4252931	-10,8706	10,9559	-22,8515	22,89227
160	0,906099	-3,5419853	-10,9873	11,0246	-22,9682	22,98611
170	0,450456	-3,5987539	-11,0441	11,0532	-23,025	23,02942
180	4,44E-16	-3,6202931	-11,0656	11,0656	-23,0465	23,04655
190	-0,452742	-3,6170184	-11,0623	11,0716	-23,0433	23,04772
200	-0,915256	-3,5777801	-11,0231	11,0610	-23,004	23,02224
210	-1,383671	-3,4727526	-10,9181	11,0054	-22,899	22,94077
220	-1,833333	-3,2621225	-10,7074	10,8632	-22,6884	22,76233
230	-2,210297	-2,9056401	-10,3509	10,5843	-22,3319	22,44101
240	-2,468988	-2,4209123	-9,86622	10,1705	-21,8472	21,98624
250	-2,516828	-1,8081961	-9,2535	9,5897	-21,2345	21,38309
260	-2,285692	-1,1380863	-8,58339	8,8825	-20,5643	20,69098
270	-1,748911	-0,5257301	-7,97104	8,1606	-19,952	20,02849
280	-0,949478	-0,1076678	-7,55297	7,6124	-19,5339	19,55699
290	-0,015086	0,00113565	-7,44417	7,4442	-19,4251	19,42513
300	0,85115	-0,2370576	-7,68236	7,7294	-19,6633	19,68173
310	1,410572	-0,7268026	-8,17211	8,2930	-20,1531	20,20236
320	1,461811	-1,1980233	-8,64333	8,7661	-20,6243	20,67602
330	0,883359	-1,1194953	-8,5648	8,6102	-20,5458	20,56473
340	-0,360002	0,74968489	-6,69562	6,7053	-18,6766	18,68004
350	-1,629064	7,13266577	-0,31264	1,6588	-12,2936	12,40106
360	-4,49E-15	18,3071794	10,86187	10,8619	-1,11908	1,119077
363	5,533445	24,2275315	16,78223	17,6709	4,801275	7,326067
370	9,006126	18,7547804	11,30948	14,4573	-0,67148	9,031123
380	8,310289	10,5317685	3,086463	8,8649	-8,89449	12,17263
390	7,025112	5,75741371	-1,68789	7,2250	-13,6688	15,36846
400	5,933303	3,05715627	-4,38815	7,3797	-16,3691	17,41125
410	5,347595	1,489383	-5,95592	8,0044	-17,9369	18,71706
420	5,184966	0,39030838	-7,055	8,7554	-19,0359	19,72945
430	5,230142	-0,5930813	-8,03839	9,5901	-20,0193	20,69126
440	5,271495	-1,5846341	-9,02994	10,4560	-21,0109	21,66209
450	5,164259	-2,5713753	-10,0167	11,2696	-21,9976	22,59569
460	4,847619	-3,4827348	-10,928	11,9550	-22,909	23,41626
470	4,331832	-4,2474829	-11,6928	12,4694	-23,6737	24,0668

480	3,670321	-4,8249764	-12,2703	12,8075	-24,2512	24,5274
490	2,929972	-5,2134169	-12,6587	12,9934	-24,6397	24,81327
500	2,037958	-5,11489	-12,5602	12,7245	-24,5411	24,62562
510	1,238734	-4,8422705	-12,2876	12,3499	-24,2685	24,30012
520	0,609693	-4,870914	-12,3162	12,3313	-24,2972	24,30482
530	1,63E-15	-4,4319853	-11,8773	11,8773	-23,8582	23,85824
540	-0,541108	-4,3229793	-11,7683	11,7807	-23,7492	23,7554
550	-1,067042	-4,1711172	-11,6164	11,6653	-23,5974	23,62149
560	-1,573813	-3,9499733	-11,3953	11,5034	-23,3762	23,42915
570	-2,036362	-3,6233805	-11,0687	11,2544	-23,0496	23,13941
580	-2,40371	-3,1598994	-10,6052	10,8742	-22,5862	22,7137
590	-2,60149	-2,5508343	-9,99614	10,3291	-21,9771	22,13053
600	-2,544383	-1,8279927	-9,2733	9,6160	-21,2542	21,406
610	-2,159027	-1,0750174	-8,52032	8,7896	-20,5013	20,61465
620	-1,505834	-0,4526601	-7,89797	8,0402	-19,8789	19,93587
630	-0,538235	-0,0610341	-7,50634	7,5256	-19,4873	19,49472
640	0,629933	-0,0474194	-7,49272	7,5192	-19,4737	19,48386
650	1,809914	-0,5040873	-7,94939	8,1528	-19,9303	20,01236
660	2,772393	-1,4284856	-8,87379	9,2968	-20,8547	21,03821
670	3,301425	-2,7056746	-10,151	10,6744	-22,1319	22,37681
680	3,252676	-4,1221702	-11,5675	12,0161	-23,5484	23,77201
690	2,597858	-5,4099013	-12,8552	13,1151	-24,8362	24,97166
700	1,440925	-6,3089185	-13,7542	13,8295	-25,7352	25,77548
710	3,25E-15	-6,6313922	-14,0767	14,0767	-26,0576	26,05765
720	0	0	-7,44531	7,4453	-19,4263	19,42626

Таблица Г2 - Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки.

Rш.ш i	Значения Rш.ш i, кН, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rш.ш 0	11560,6	11560,6	11560,6	0	0	0	0	0	0	0	11560,6	11560,6
Rш.ш 10	11375,9	11375,9	11375,9	0	0	0	0	0	0	0	11375,9	11375,9
Rш.ш 20	10751	10751	10751	0	0	0	0	0	0	0	10751	10751
Rш.ш 30	9715,01	9715,01	9715,01	0	0	0	0	0	0	0	0	9715,01
Rш.ш 40	8422,18	8422,18	8422,18	0	0	0	0	0	0	0	0	8422,18
Rш.ш 50	7038,64	7038,64	7038,64	0	0	0	0	0	0	0	0	7038,64
Rш.ш 60	5810,34	5810,34	5810,34	0	0	0	0	0	0	0	0	5810,34
Rш.ш 70	5051,25	5051,25	5051,25	0	0	0	0	0	0	0	5051,25	5051,25
Rш.ш 80	4984,31	4984,31	4984,31	0	0	0	0	0	0	0	4984,31	4984,31
Rш.ш 90	5498,01	5498,01	0	0	0	0	0	0	0	0	5498,01	5498,01
Rш.ш 100	6299,36	6299,36	0	0	0	0	0	0	0	0	6299,36	6299,36
Rш.ш 110	7048,04	7048,04	0	0	0	0	0	0	0	0	7048,04	7048,04
Rш.ш 120	7650,26	7650,26	0	0	0	0	0	0	0	0	7650,26	7650,26
Rш.ш 130	8071,38	8071,38	0	0	0	0	0	0	0	0	8071,38	8071,38
Rш.ш 140	8331,29	8331,29	0	0	0	0	0	0	0	0	8331,29	8331,29
Rш.ш 150	8465,23	8465,23	0	0	0	0	0	0	0	0	8465,23	8465,23
Rш.ш 160	8519,51	8519,51	8519,51	0	0	0	0	0	0	0	8519,51	8519,51
Rш.ш 170	8539,84	8539,84	8539,84	0	0	0	0	0	0	0	8539,84	8539,84
Rш.ш 180	8549,49	8549,49	8549,49	0	0	0	0	0	0	0	8549,49	8549,49
Rш.ш 190	8558,2	8558,2	8558,2	0	0	0	0	0	0	0	8558,2	8558,2
Rш.ш 200	8556,08	8556,08	8556,08	0	0	0	0	0	0	0	8556,08	8556,08
Rш.ш 210	8515,13	8515,13	8515,13	0	0	0	0	0	0	0	0	8515,13
Rш.ш 220	8393,98	8393,98	8393,98	0	0	0	0	0	0	0	0	8393,98
Rш.ш 230	8140,65	8140,65	8140,65	0	0	0	0	0	0	0	0	8140,65
Rш.ш 240	7753,71	7753,71	7753,71	0	0	0	0	0	0	0	0	7753,71
Rш.ш 250	7192,15	7192,15	7192,15	0	0	0	0	0	0	0	0	7192,15
Rш.ш 260	6483,55	6483,55	6483,55	0	0	0	0	0	0	0	0	6483,55
Rш.ш 270	5728,43	5728,43	5728,43	0	0	0	0	0	0	0	0	5728,43
Rш.ш 280	5125,58	5125,58	5125,58	0	0	0	0	0	0	0	5125,58	5125,58
Rш.ш 290	4928,09	4928,09	4928,09	0	0	0	0	0	0	0	4928,09	4928,09
Rш.ш 300	5235,9	5235,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5235,9	5235,9
Rш.ш 310	5829,24	5829,24	0	0	0	0	0	0	0	0	5829,24	5829,24
Rш.ш 320	6299,19	6299,19	0	0	0	0	0	0	0	0	6299,19	6299,19
Rш.ш 330	6112,86	6112,86	0	0	0	0	0	0	0	0	6112,86	6112,86

RIII. III 340	4194,99	4194,99	4194,99	0	0	0	0	0	0	0	4194,99	4194,99
RIII. III 350	2740,27	2740,27	2740,27	0	0	0	0	0	0	0	2740,27	2740,27
RIII. III 360	13378	13378	13378	0	0	0	0	0	0	0	13378	13378
RIII. III 370	20076	20076	20076	0	0	0	0	0	0	0	20076	20076
RIII. III 380	16500,2	16500,2	16500,2	0	0	16500,21	16500,2	16500,2	0	0	16500,2	16500,2
RIII. III 390	0	0	0	0	0	0	0	0	10022,5	10022,5	10022,5	10022,5
RIII. III 400	7073,76	7073,76	0	0	0	0	0	0	0	0	7073,76	7073,76
RIII. III 410	6221,63	6221,63	0	0	0	0	0	0	0	0	6221,63	6221,63
RIII. III 420	6358,39	6358,39	0	0	0	0	0	0	0	0	6358,39	6358,39
RIII. III 430	6890,97	6890,97	0	0	0	0	0	0	0	0	6890,97	6890,97
RIII. III 440	7605,92	7605,92	0	0	0	0	0	0	0	0	7605,92	7605,92
RIII. III 450	8379,66	0	0	0	0	0	0	0	0	8379,66	8379,66	8379,66
RIII. III 460	9106,49	9106,49	0	0	0	0	0	0	0	0	9106,49	9106,49
RIII. III 470	9708,76	9708,76	0	0	0	0	0	0	0	0	9708,76	9708,76
RIII. III 480	10147,7	10147,7	0	0	0	0	0	0	0	0	10147,7	10147,7
RIII. III 490	10421,9	10421,9	0	0	0	0	0	0	0	0	10421,9	10421,9
RIII. III 500	10557,3	10557,3	0	0	0	0	0	0	0	0	10557,3	10557,3
RIII. III 510	10248,8	10248,8	0	0	0	0	0	0	0	0	10248,8	10248,8
RIII. III 520	9849,68	9849,68	9849,68	0	0	0	0	0	0	0	9849,68	9849,68
RIII. III 530	9819,06	9819,06	9819,06	0	0	0	0	0	0	0	9819,06	9819,06
RIII. III 540	9361,19	9361,19	9361,19	0	0	0	0	0	0	0	9361,19	9361,19
RIII. III 550	9267,99	9267,99	9267,99	0	0	0	0	0	0	0	9267,99	9267,99
RIII. III 560	9162,66	9162,66	9162,66	0	0	0	0	0	0	0	9162,66	9162,66
RIII. III 570	9017,57	9017,57	9017,57	0	0	0	0	0	0	0	0	9017,57
RIII. III 580	8791,67	8791,67	8791,67	0	0	0	0	0	0	0	0	8791,67
RIII. III 590	8438,68	8438,68	8438,68	0	0	0	0	0	0	0	0	8438,68
RIII. III 600	7919,51	7919,51	7919,51	0	0	0	0	0	0	0	0	7919,51
RIII. III 610	7220,36	7220,36	7220,36	0	0	0	0	0	0	0	0	7220,36
RIII. III 620	6380,6	6380,6	6380,6	0	0	0	0	0	0	0	0	6380,6
RIII. III 630	5588,56	5588,56	5588,56	0	0	0	0	0	0	0	0	5588,56
RIII. III 640	5019,18	5019,18	5019,18	0	0	0	0	0	0	0	5019,18	5019,18
RIII. III 650	5016,33	5016,33	5016,33	0	0	0	0	0	0	0	5016,33	5016,33
RIII. III 660	5726,82	5726,82	0	0	0	0	0	0	0	0	5726,82	5726,82
RIII. III 670	6935,87	6935,87	0	0	0	0	0	0	0	0	6935,87	6935,87
RIII. III 680	8318,1	8318,1	0	0	0	0	0	0	0	0	8318,1	8318,1
RIII. III 690	9618,07	9618,07	0	0	0	0	0	0	0	0	9618,07	9618,07
RIII. III 700	10660,5	10660,5	0	0	0	0	0	0	0	0	10660,5	10660,5

Rш.ш 710	11330,1	11330,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11330,1	11330,1
ΣRш.ш i	11560,6	11560,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11560,6	11560,6

Таблица Г3 – Расчет сил, действующих на коренные шейки коленчатого вала.

1-я коренная шейка	1-й кривошип				2-я коренная шейка			2-й кривошип			3-я коренная шейка			3-й кривошип		
	Rк.ш1, Н	φ <sub>кв</sub> , град	Rк1, Н	T1, Н	Kрк1, Н	Tк2, Н	Kк2, Н	Rк.ш2, Н	φ <sub>кв</sub> , град	T2, Н	Kрк2, Н	Tк3, Н	Kк3, Н	Rк.ш3, Н	φ <sub>кв</sub> , град	T3, Н
9807,07	0	19614,13	0	-19614,13	2,2E-13	1505,5	1505,55	180	4,4E-13	-16603,04	1E-12	-17008,88	17008,88	540	1,63E-12	-17414,73
9695,45	10	19390,9	-1451,17	-19336,52	499,214	1368,4	1456,6	190	-452,74	-16599,76	-496,925	-16952,74	16960,02	550	-541,108	-17305,72
9331,63	20	18663,26	-2637,84	-18475,91	861,293	957,69	1288,02	200	-915,26	-16560,52	-991,149	-16857,19	16886,3	560	-1067,04	-17153,86
8751,06	30	17502,12	-3315,97	-17185,12	966,149	364,81	1032,73	210	-1383,7	-16455,49	-1478,74	-16694,1	16759,47	570	-1573,81	-16932,72
8061,67	40	16123,34	-3391,85	-15762,53	779,261	-241,17	815,727	220	-1833,3	-16244,86	-1934,85	-16425,49	16539,06	580	-2036,36	-16606,12
7378,67	50	14757,34	-2889,68	-14471,66	339,689	-708,36	785,599	230	-2210,3	-15888,38	-2307	-16015,51	16180,82	590	-2403,71	-16142,64
6833,19	60	13666,37	-1951,64	-13526,3	-258,674	-938,68	973,665	240	-2469	-15403,65	-2535,24	-15468,62	15675	600	-2601,49	-15533,58
6533,18	70	13066,36	-791,791	-13042,35	-862,519	-874,3	1228,14	250	-2516,8	-14790,94	-2530,61	-14800,84	15015,62	610	-2544,38	-14810,73
6514,75	80	13029,5	366,7987	-13024,34	-1326,25	-548,25	1435,1	260	-2285,7	-14120,83	-2222,36	-14089,29	14263,49	620	-2159,03	-14057,76
6726,3	90	13452,61	1340,378	-13385,67	-1544,64	-61,403	1545,86	270	-1748,9	-13508,47	-1627,37	-13471,94	13569,87	630	-1505,83	-13435,4
7078,83	100	14157,67	2057,741	-14007,33	-1503,61	458,46	1571,95	280	-949,48	-13090,41	-743,857	-13067,09	13088,25	640	-538,235	-13043,78
7440,04	110	14880,07	2375,308	-14689,26	-1195,2	853,83	1468,85	290	-15,086	-12981,61	307,423	-13005,88	13009,52	650	629,9328	-13030,16
7753,44	120	15506,88	2385,943	-15322,23	-767,397	1051,2	1301,52	300	851,15	-13219,8	1330,53	-13353,31	13419,44	660	1809,914	-13486,83
7988,24	130	15976,48	2165,192	-15829,09	-377,31	1059,8	1124,93	310	1410,57	-13709,54	2091,48	-14060,39	14215,09	670	2772,393	-14411,23
8143,85	140	16287,69	1801,254	-16187,79	-169,722	1003,5	1017,76	320	1461,81	-14180,77	2381,62	-14934,59	15123,3	680	3301,425	-15688,42
8232,35	150	16464,7	1364,761	-16408,04	-240,701	1152,9	1177,76	330	883,359	-14102,24	2068,02	-15603,57	15740,02	690	3252,676	-17104,91
8274,78	160	16549,55	906,0992	-16524,73	-633,051	2145,8	2237,27	340	-360	-12233,06	1118,93	-15312,85	15353,68	700	2597,858	-18392,64
8293,81	170	16587,61	450,4563	-16581,5	-1039,76	5365,7	5465,52	350	-1629,1	-5850,076	-94,0698	-12570,87	12571,22	710	1440,925	-19291,66
8301,52	180	16603,04	4,44E-13	-16603,04	-2,5E-12	10964	10963,7	360	-4E-12	5324,437	-6,2E-13	-7144,848	7144,848	720	3,25E-12	-19614,13

8302,97	190	16605,93	-452,742	-16599,76	2993,09	13922	14240,4	370	5533,44	11244,79	2766,72	-4184,672	5016,596	0	0	-19614,13
8292,9	200	16585,79	-915,256	-16560,52	4960,69	11166	12218,6	380	9006,13	5772,038	3777,48	-6782,242	7763,256	10	-1451,17	-19336,52
8256,78	210	16513,57	-1383,67	-16455,49	4846,98	7002,3	8516,15	390	8310,29	-2450,974	2836,22	-10463,44	10841,02	20	-2637,84	-18475,91
8173,99	220	16347,99	-1833,33	-16244,86	4429,22	4509,8	6321,08	400	7025,11	-7225,328	1854,57	-12205,23	12345,32	30	-3315,97	-17185,12
8020,69	230	16041,39	-2210,3	-15888,38	4071,8	2981,4	5046,61	410	5933,3	-9925,586	1270,72	-12844,06	12906,76	40	-3391,85	-15762,53
7800,14	240	15600,27	-2468,99	-15403,65	3908,29	1955,1	4370,05	420	5347,59	-11493,36	1228,96	-12982,51	13040,55	50	-2889,68	-14471,66
7501,77	250	15003,54	-2516,83	-14790,94	3850,9	1099,3	4004,72	430	5184,97	-12592,43	1616,66	-13059,37	13159,05	60	-1951,64	-13526,3
7152,31	260	14304,62	-2285,69	-14120,83	3757,92	272,5	3767,78	440	5230,14	-13575,82	2219,18	-13309,08	13492,83	70	-791,791	-13042,35
6810,61	270	13621,22	-1748,91	-13508,47	3510,2	-529,45	3549,91	450	5271,49	-14567,38	2819,15	-13795,86	14080,95	80	366,7987	-13024,34
6562,4	280	13124,8	-949,478	-13090,41	3056,87	-1231,9	3295,74	460	5164,26	-15554,12	3252,32	-14469,89	14830,89	90	1340,378	-13385,67
6490,81	290	12981,62	-15,0863	-12981,61	2431,35	-1741,9	2990,96	470	4847,62	-16465,48	3452,68	-15236,4	15622,71	100	2057,741	-14007,33
6623,59	300	13247,17	851,1497	-13219,8	1740,34	-2005,2	2655,12	480	4331,83	-17230,22	3353,57	-15959,74	16308,28	110	2375,308	-14689,26
6890,96	310	13781,92	1410,572	-13709,54	1129,87	-2049,1	2339,95	490	3670,32	-17807,72	3028,13	-16564,97	16839,47	120	2385,943	-15322,23
7127,96	320	14255,91	1461,811	-14180,77	734,081	-2007,7	2137,69	500	2929,97	-18196,16	2547,58	-17012,62	17202,31	130	2165,192	-15829,09
7064,94	330	14129,88	883,3588	-14102,24	577,3	-1997,7	2079,44	510	2037,96	-18097,63	1919,61	-17142,71	17249,85	140	1801,254	-16187,79
6119,18	340	12238,35	-360,002	-12233,06	799,368	-2796	2908	520	1238,73	-17825,01	1301,75	-17116,52	17165,95	150	1364,761	-16408,04
3036,33	350	6072,664	-1629,06	-5850,076	1119,38	-6001,8	6105,28	530	609,693	-17853,66	757,896	-17189,19	17205,89	160	906,0992	-16524,73
2662,22	360	5324,437	-4,5E-12	5324,437	3,1E-12	-11370	11369,6	540	1,6E-12	-17414,73	225,228	-16998,11	16999,6	170	450,4563	-16581,5
6266,26	370	12532,53	5533,445	11244,79	-3037,28	-14275	14594,8	550	-541,11	-17305,72	-270,554	-16954,38	16956,54	180	4,44E-13	-16603,04
5348,52	380	10697,04	9006,126	5772,038	-5036,58	-11463	12520,6	560	-1067	-17153,86	-759,892	-16876,81	16893,91	190	-452,742	-16599,76
4332,09	390	8664,189	8310,289	-2450,974	-4942,05	-7240,9	8766,65	570	-1573,8	-16932,72	-1244,53	-16746,62	16792,8	200	-915,256	-16560,52
5038,79	400	10077,58	7025,112	-7225,328	-4530,74	-4690,4	6521,3	580	-2036,4	-16606,12	-1710,02	-16530,81	16619,02	210	-1383,67	-16455,49
5781,9	410	11563,79	5933,303	-9925,586	-4168,51	-3108,5	5199,94	590	-2403,7	-16142,64	-2118,52	-16193,75	16331,74	220	-1833,33	-16244,86
6338,26	420	12676,52	5347,595	-11493,36	-3974,54	-2020,1	4458,46	600	-2601,5	-15533,58	-2405,89	-15710,98	15894,12	230	-2210,3	-15888,38
6809,06	430	13618,12	5184,966	-12592,43	-3864,67	-1109,2	4020,69	610	-2544,4	-14810,73	-2506,69	-15107,19	15313,75	240	-2468,99	-15403,65
7274,22	440	14548,45	5230,142	-13575,82	-3694,58	-240,97	3702,43	620	-2159	-14057,76	-2337,93	-14424,35	14612,59	250	-2516,83	-14790,94
7745,92	450	15491,84	5271,495	-14567,38	-3388,66	565,99	3435,61	630	-1505,8	-13435,4	-1895,76	-13778,12	13907,92	260	-2285,69	-14120,83
8194,51	460	16389,02	5164,259	-15554,12	-2851,25	1255,2	3115,29	640	-538,24	-13043,78	-1143,57	-13276,12	13325,29	270	-1748,91	-13508,47
8582,12	470	17164,25	4847,619	-16465,48	-2108,84	1717,7	2719,85	650	629,933	-13030,16	-159,773	-13060,29	13061,26	280	-949,478	-13090,41

8883,21	480	17766,41	4331,832	-17230,22	-1260,96	1871,7	2256,83	660	1809,91	-13486,83	897,414	-13234,22	13264,61	290	-15,0863	-12981,61
9091,01	490	18182,03	3670,321	-17807,72	-448,964	1698,2	1756,59	670	2772,39	-14411,23	1811,77	-13815,51	13933,81	300	851,1497	-13219,8
9215,27	500	18430,54	2929,972	-18196,16	185,727	1253,9	1267,55	680	3301,42	-15688,42	2356	-14698,98	14886,6	310	1410,572	-13709,54
9106,01	510	18212,02	2037,958	-18097,63	607,359	496,36	784,384	690	3252,68	-17104,91	2357,24	-15642,84	15819,45	320	1461,811	-14180,77
8934	520	17868	1238,734	-17825,01	679,562	-283,82	736,448	700	2597,86	-18392,64	1740,61	-16247,44	16340,41	330	883,3588	-14102,24
8932,03	530	17864,06	609,6927	-17853,66	415,616	-719	830,482	710	1440,92	-19291,66	540,461	-15762,36	15771,62	340	-360,002	-12233,06
8707,36	540	17414,73	1,63E-12	-17414,73	8,1E-13	-1099,7	1099,7	720	3,2E-12	-19614,13	-814,532	-12732,11	12758,13	350	-1629,06	-5850,076
8657,09	550	17314,18	-541,108	-17305,72	270,554	-1154,2	1185,49	0	0	-19614,13	-2,2E-12	-7144,848	7144,848	360	-4,5E-12	5324,4374
8593,51	560	17187,01	-1067,04	-17153,86	-192,065	-1091,3	1108,1	10	-1451,2	-19336,52	2041,14	-4045,867	4531,586	370	5533,445	11244,79
8502,85	570	17005,7	-1573,81	-16932,72	-532,015	-771,6	937,231	20	-2637,8	-18475,91	3184,14	-6351,935	7105,339	380	9006,126	5772,0384
8365,26	580	16730,51	-2036,36	-16606,12	-639,803	-289,5	702,253	30	-3316	-17185,12	2497,16	-9818,049	10130,64	390	8310,289	-2450,974
8160,31	590	16320,62	-2403,71	-16142,64	-494,072	190,06	529,367	40	-3391,9	-15762,53	1816,63	-11493,93	11636,6	400	7025,112	-7225,328
7874,96	600	15749,91	-2601,49	-15533,58	-144,093	530,96	550,164	50	-2889,7	-14471,66	1521,81	-12198,62	12293,18	410	5933,303	-9925,586
7513,85	610	15027,7	-2544,38	-14810,73	296,371	642,22	707,303	60	-1951,6	-13526,3	1697,98	-12509,83	12624,54	420	5347,595	-11493,36
7111,29	620	14222,59	-2159,03	-14057,76	683,618	507,71	851,528	70	-791,79	-13042,35	2196,59	-12817,39	13004,25	430	5184,966	-12592,43
6759,76	630	13519,53	-1505,83	-13435,4	936,316	205,53	958,609	80	366,799	-13024,34	2798,47	-13300,08	13591,3	440	5230,142	-13575,82
6527,44	640	13054,88	-538,235	-13043,78	939,306	-170,94	954,735	90	1340,38	-13385,67	3305,94	-13976,52	14362,18	450	5271,495	-14567,38
6522,69	650	13045,38	629,9328	-13030,16	713,904	-488,58	865,085	100	2057,74	-14007,33	3611	-14780,72	15215,42	460	5164,259	-15554,12
6803,87	660	13607,73	1809,914	-13486,83	282,697	-601,22	664,364	110	2375,31	-14689,26	3611,46	-15577,37	15990,53	470	4847,619	-16465,48
7337,74	670	14675,48	2772,393	-14411,23	-193,225	-455,5	494,788	120	2385,94	-15322,23	3358,89	-16276,23	16619,2	480	4331,832	-17230,22
8016,01	680	16032,02	3301,425	-15688,42	-568,116	-70,335	572,454	130	2165,19	-15829,09	2917,76	-16818,4	17069,62	490	3670,321	-17807,72
8705,72	690	17411,43	3252,676	-17104,91	-725,711	458,56	858,45	140	1801,25	-16187,79	2365,61	-17191,97	17353,96	500	2929,972	-18196,16
9287,6	700	18575,2	2597,858	-18392,64	-616,548	992,3	1168,25	150	1364,76	-16408,04	1701,36	-17252,83	17336,52	510	2037,958	-18097,63
9672,7	710	19345,4	1440,925	-19291,66	-267,413	1383,5	1409,07	160	906,099	-16524,73	1072,42	-17174,87	17208,32	520	1238,734	-17825,01

Таблица Г4 – силы, действующие на 3-ю коренную шейку.

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	17008,88	17008,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17008,9
Рк.ш 10	16960,02	16960,02	16960	0	0	0	0	0	0	0	0	16960
Рк.ш 20	16886,3	16886,3	16886,3	0	0	0	0	0	0	0	0	16886,3
Рк.ш 30	16759,47	16759,47	16759,5	0	0	0	0	0	0	0	0	16759,5
Рк.ш 40	16539,06	16539,06	16539,1	0	0	0	0	0	0	0	0	16539,1
Рк.ш 50	16180,82	16180,82	16180,8	0	0	0	0	0	0	0	0	16180,8
Рк.ш 60	15675	15675	15675	0	0	0	0	0	0	0	0	15675
Рк.ш 70	15015,62	15015,62	15015,6	0	0	0	0	0	0	0	0	15015,6
Рк.ш 80	14263,49	14263,49	0	0	0	0	0	0	0	0	14263,5	14263,5
Рк.ш 90	13569,87	13569,87	0	0	0	0	0	0	0	0	13569,9	13569,9
Рк.ш 100	13088,25	13088,25	0	0	0	0	0	0	0	0	13088,2	13088,2
Рк.ш 110	13009,52	13009,52	0	0	0	0	0	0	0	0	13009,5	13009,5
Рк.ш 120	13419,44	13419,44	0	0	0	0	0	0	0	0	13419,4	13419,4
Рк.ш 130	14215,09	14215,09	0	0	0	0	0	0	0	0	14215,1	14215,1
Рк.ш 140	15123,3	15123,3	0	0	0	0	0	0	0	0	15123,3	15123,3
Рк.ш 150	15740,02	15740,02	0	0	0	0	0	0	0	0	15740	15740
Рк.ш 160	15353,68	15353,68	0	0	0	0	0	0	0	0	15353,7	15353,7
Рк.ш 170	12571,22	12571,22	0	0	0	0	0	0	0	0	12571,2	12571,2
Рк.ш 180	7144,848	7144,848	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7144,85
Рк.ш 190	5016,596	5016,596	5016,6	0	0	0	0	0	0	0	0	5016,6
Рк.ш 200	7763,256	7763,256	7763,26	0	0	0	0	0	0	0	0	7763,26
Рк.ш 210	10841,02	10841,02	10841	0	0	0	0	0	0	0	0	10841
Рк.ш 220	12345,32	12345,32	12345,3	0	0	0	0	0	0	0	0	12345,3
Рк.ш 230	12906,76	12906,76	12906,8	0	0	0	0	0	0	0	0	12906,8
Рк.ш 240	13040,55	13040,55	13040,5	0	0	0	0	0	0	0	0	13040,5
Рк.ш 250	13159,05	13159,05	13159,1	0	0	0	0	0	0	0	0	13159,1
Рк.ш 260	13492,83	13492,83	13492,8	0	0	0	0	0	0	0	0	13492,8
Рк.ш 270	14080,95	14080,95	14081	0	0	0	0	0	0	0	0	14081
Рк.ш 280	14830,89	14830,89	14830,9	0	0	0	0	0	0	0	0	14830,9
Рк.ш 290	15622,71	15622,71	15622,7	0	0	0	0	0	0	0	0	15622,7
Рк.ш 300	16308,28	16308,28	0	0	0	0	0	0	0	0	16308,3	16308,3
Рк.ш 310	16839,47	16839,47	0	0	0	0	0	0	0	0	16839,5	16839,5
Рк.ш 320	17202,31	17202,31	0	0	0	0	0	0	0	0	17202,3	17202,3
Рк.ш 330	17249,85	17249,85	0	0	0	0	0	0	0	0	17249,9	17249,9
Рк.ш 340	17165,95	17165,95	17166	0	0	0	0	0	0	0	0	17166
Рк.ш 350	17205,89	0	0	0	0	0	0	0	0	17205,8919	17205,9	17205,9
Рк.ш 360	16999,6	16999,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16999,6
Рк.ш 370	16956,54	16956,54	16956,5	0	0	0	0	0	0	0	0	16956,5
Рк.ш 380	16893,91	16893,91	16893,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	16792,8	16792,8	16792,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	16619,02	16619	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16331,7	16331,7
Рк.ш 420	15894,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15894,1	15894,1
Рк.ш 430	15313,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15313,7	15313,7
Рк.ш 440	14612,59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14612,6	14612,6
Рк.ш 450	13907,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13907,9	13907,9
Рк.ш 460	13325,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13325,3	13325,3
Рк.ш 470	13061,26	13061,26	0	0	0	0	0	0	0	0	13061,3	13061,3
Рк.ш 480	13264,61	13264,61	0	0	0	0	0	0	0	0	13264,6	13264,6
Рк.ш 490	13933,81	13933,81	0	0	0	0	0	0	0	0	13933,8	13933,8
Рк.ш 500	14886,6	14886,6	0	0	0	0	0	0	0	0	14886,6	14886,6
Рк.ш 510	15819,45	15819,45	0	0	0	0	0	0	0	0	15819,5	15819,5
Рк.ш 520	16340,41	16340,41	0	0	0	0	0	0	0	0	16340,4	16340,4
Рк.ш 530	15771,62	15771,62	0	0	0	0	0	0	0	0	15771,6	15771,6
Рк.ш 540	12758,13	12758,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12758,1
Рк.ш 550	7144,848	7144,848	7144,85	0	0	0	0	0	0	0	0	7144,85
Рк.ш 560	4531,586	4531,586	4531,59	0	0	0	0	0	0	0	0	4531,59
Рк.ш 570	7105,339	7105,339	7105,34	0	0	0	0	0	0	0	0	7105,34
Рк.ш 580	10130,64	10130,64	10130,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10130,6
Рк.ш 590	11636,6	11636,6	11636,6	0	0	0	0	0	0	0	0	11636,6

Рк.ш 600	12293,18	12293,18	12293,2	0	0	0	0	0	0	0	0	12293,2
Рк.ш 610	12624,54	12624,54	12624,5	0	0	0	0	0	0	0	0	12624,5
Рк.ш 620	13004,25	13004,25	13004,2	0	0	0	0	0	0	0	0	13004,2
Рк.ш 630	13591,3	13591,3	13591,3	0	0	0	0	0	0	0	0	13591,3
Рк.ш 640	14362,18	14362,18	14362,2	0	0	0	0	0	0	0	0	14362,2
Рк.ш 650	15215,42	15215,42	0	0	0	0	0	0	0	0	15215,4	15215,4
Рк.ш 660	15990,53	15990,53	0	0	0	0	0	0	0	0	15990,5	15990,5
Рк.ш 670	16619,2	16619,2	0	0	0	0	0	0	0	0	16619,2	16619,2
Рк.ш 680	17069,62	17069,62	0	0	0	0	0	0	0	0	17069,6	17069,6
Рк.ш 690	17353,96	17353,96	0	0	0	0	0	0	0	0	17354	17354
Рк.ш 700	17336,52	17336,52	0	0	0	0	0	0	0	0	17336,5	17336,5
Рк.ш 710	17208,32	17208,32	0	0	0	0	0	0	0	0	17208,3	17208,3
ΣРк.ш i	17225,73	17225,73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17225,7

Таблица 5 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	9807,067094	9807,067094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9807,067094
Рк.ш 10	9695,450119	9695,450119	9695,450119	0	0	0	0	0	0	0	0	9695,450119
Рк.ш 20	9331,63219	9331,63219	9331,63219	0	0	0	0	0	0	0	0	9331,63219
Рк.ш 30	8751,059075	8751,059075	8751,059075	0	0	0	0	0	0	0	0	8751,059075
Рк.ш 40	8061,66816	8061,66816	8061,66816	0	0	0	0	0	0	0	0	8061,66816
Рк.ш 50	7378,670534	7378,670534	7378,670534	0	0	0	0	0	0	0	0	7378,670534
Рк.ш 60	6833,186689	6833,186689	6833,186689	0	0	0	0	0	0	0	0	6833,186689
Рк.ш 70	6533,179012	6533,179012	6533,179012	0	0	0	0	0	0	0	0	6533,179012
Рк.ш 80	6514,749899	6514,749899	0	0	0	0	0	0	0	0	6514,749899	6514,749899
Рк.ш 90	6726,303766	6726,303766	0	0	0	0	0	0	0	0	6726,303766	6726,303766
Рк.ш 100	7078,83328	7078,83328	0	0	0	0	0	0	0	0	7078,83328	7078,83328
Рк.ш 110	7440,03631	7440,03631	0	0	0	0	0	0	0	0	7440,03631	7440,03631
Рк.ш 120	7753,440316	7753,440316	0	0	0	0	0	0	0	0	7753,440316	7753,440316
Рк.ш 130	7988,242265	7988,242265	0	0	0	0	0	0	0	0	7988,242265	7988,242265
Рк.ш 140	8143,846498	8143,846498	0	0	0	0	0	0	0	0	8143,846498	8143,846498
Рк.ш 150	8232,347609	8232,347609	0	0	0	0	0	0	0	0	8232,347609	8232,347609
Рк.ш 160	8274,775345	8274,775345	0	0	0	0	0	0	0	0	8274,775345	8274,775345
Рк.ш 170	8293,806699	8293,806699	0	0	0	0	0	0	0	0	8293,806699	8293,806699
Рк.ш 180	8301,51756	8301,51756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8301,51756
Рк.ш 190	8302,966666	8302,966666	8302,966666	0	0	0	0	0	0	0	0	8302,966666
Рк.ш 200	8292,897373	8292,897373	8292,897373	0	0	0	0	0	0	0	0	8292,897373
Рк.ш 210	8256,782808	8256,782808	8256,782808	0	0	0	0	0	0	0	0	8256,782808
Рк.ш 220	8173,994324	8173,994324	8173,994324	0	0	0	0	0	0	0	0	8173,994324
Рк.ш 230	8020,693558	8020,693558	8020,693558	0	0	0	0	0	0	0	0	8020,693558
Рк.ш 240	7800,135701	7800,135701	7800,135701	0	0	0	0	0	0	0	0	7800,135701
Рк.ш 250	7501,771041	7501,771041	7501,771041	0	0	0	0	0	0	0	0	7501,771041
Рк.ш 260	7152,310446	7152,310446	7152,310446	0	0	0	0	0	0	0	0	7152,310446
Рк.ш 270	6810,607705	6810,607705	6810,607705	0	0	0	0	0	0	0	0	6810,607705
Рк.ш 280	6562,399268	6562,399268	6562,399268	0	0	0	0	0	0	0	0	6562,399268
Рк.ш 290	6490,807569	6490,807569	6490,807569	0	0	0	0	0	0	0	0	6490,807569
Рк.ш 300	6623,585843	6623,585843	0	0	0	0	0	0	0	0	6623,585843	6623,585843
Рк.ш 310	6890,960137	6890,960137	0	0	0	0	0	0	0	0	6890,960137	6890,960137
Рк.ш 320	7127,955419	7127,955419	0	0	0	0	0	0	0	0	7127,955419	7127,955419
Рк.ш 330	7064,938448	7064,938448	0	0	0	0	0	0	0	0	7064,938448	7064,938448
Рк.ш 340	6119,176583	6119,176583	6119,176583	0	0	0	0	0	0	0	0	6119,176583
Рк.ш 350	3036,331803	0	0	0	0	0	0	0	0	3036,331803	3036,331803	3036,331803
Рк.ш 360	2662,21871	2662,21871	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2662,21871
Рк.ш 370	6266,264835	6266,264835	6266,264835	0	0	0	0	0	0	0	0	6266,264835
Рк.ш 380	5348,521415	5348,521415	5348,521415	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	4332,094654	4332,094654	4332,094654	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	5038,788872	5038,788872	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5781,897007	5781,897007
Рк.ш 420	6338,258244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6338,258244	6338,258244
Рк.ш 430	6809,061101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6809,061101	6809,061101
Рк.ш 440	7274,224478	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7274,224478	7274,224478
Рк.ш 450	7745,919951	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7745,919951	7745,919951
Рк.ш 460	8194,512408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8194,512408	8194,512408
Рк.ш 470	8582,122917	8582,122917	0	0	0	0	0	0	0	0	8582,122917	8582,122917

RK. III 480	8883,206292	8883,206292	0	0	0	0	0	0	0	0	8883,206292	8883,206292
RK. III 490	9091,013297	9091,013297	0	0	0	0	0	0	0	0	9091,013297	9091,013297
RK. III 500	9215,271723	9215,271723	0	0	0	0	0	0	0	0	9215,271723	9215,271723
RK. III 510	9106,008402	9106,008402	0	0	0	0	0	0	0	0	9106,008402	9106,008402
RK. III 520	8934,001531	8934,001531	0	0	0	0	0	0	0	0	8934,001531	8934,001531
RK. III 530	8932,03166	8932,03166	0	0	0	0	0	0	0	0	8932,03166	8932,03166
RK. III 540	8707,36367	8707,36367	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8707,36367
RK. III 550	8657,089406	8657,089406	8657,089406	0	0	0	0	0	0	0	0	8657,089406
RK. III 560	8593,507213	8593,507213	8593,507213	0	0	0	0	0	0	0	0	8593,507213
RK. III 570	8502,848557	8502,848557	8502,848557	0	0	0	0	0	0	0	0	8502,848557
RK. III 580	8365,256607	8365,256607	8365,256607	0	0	0	0	0	0	0	0	8365,256607
RK. III 590	8160,310847	8160,310847	8160,310847	0	0	0	0	0	0	0	0	8160,310847
RK. III 600	7874,956292	7874,956292	7874,956292	0	0	0	0	0	0	0	0	7874,956292
RK. III 610	7513,849679	7513,849679	7513,849679	0	0	0	0	0	0	0	0	7513,849679
RK. III 620	7111,293746	7111,293746	7111,293746	0	0	0	0	0	0	0	0	7111,293746
RK. III 630	6759,762679	6759,762679	6759,762679	0	0	0	0	0	0	0	0	6759,762679
RK. III 640	6527,43811	6527,43811	6527,43811	0	0	0	0	0	0	0	0	6527,43811
RK. III 650	6522,68968	6522,68968	0	0	0	0	0	0	0	0	6522,68968	6522,68968
RK. III 660	6803,865699	6803,865699	0	0	0	0	0	0	0	0	6803,865699	6803,865699
RK. III 670	7337,738806	7337,738806	0	0	0	0	0	0	0	0	7337,738806	7337,738806
RK. III 680	8016,012437	8016,012437	0	0	0	0	0	0	0	0	8016,012437	8016,012437
RK. III 690	8705,715368	8705,715368	0	0	0	0	0	0	0	0	8705,715368	8705,715368
RK. III 700	9287,601858	9287,601858	0	0	0	0	0	0	0	0	9287,601858	9287,601858
RK. III 710	9672,699073	9672,699073	0	0	0	0	0	0	0	0	9672,699073	9672,699073
ΣRK. III i	9807,067094	9807,067094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9807,067094

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Д.1 Расчет элементов системы смазки

#### Д.1.1 Расчет масляного насоса

Общее количество тепла, выделяемого в течении 1 с, определяется по данным теплового расчета  $Q_0=215,88$  кДж/с. [1]

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя:

$$Q_m=0,021 \cdot Q_0=0,021 \cdot 215,88=4,53 \text{ кДж/с.}$$

Теплоемкость масла  $c_m=2,094$  кДж/(кг·К).

Плотность масла  $\rho_m=900$  кг/м<sup>3</sup>.

Температура нагрева масла в двигателе  $\Delta T_m=10$  К.

Циркуляционный расход масла

$$V_u = Q_m / (\rho_m c_m \Delta T_m) = 4,53 / (900 \cdot 2,094 \cdot 10) = 0,000238 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе

$$V^* = 2V_u = 2 \cdot 0,000238 = 0,000478 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

Объемный коэффициент подачи  $\eta_n=0,7$ .

Расчетная производительность насоса

$$V_p = V^* / \eta_n = 0,000478 / 0,7 = 0,000682 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

Модуль зацепления зуба  $m=4,5$  мм.

Высота зуба  $h=2m=2\cdot 4,5=9$  мм.

Число зубьев шестерен  $z=7$ .

Диаметр начальной окружности шестерни

$$D_0=zm=7\cdot 4,5=31,5 \text{ мм}=0,0315 \text{ м.}$$

Диаметр внешней окружности шестерни

$$D=m(z+2)=4,5(7+2)=40,5 \text{ мм}=0,0405 \text{ м.}$$

Окружная частота на внешнем диаметре шестерни  $u_n=6,36$  м/с.

Частота вращения шестерни (насоса)

$$n_n= u_n 60/(\pi D)=6,36\cdot 60/3,14\cdot 0,0405=3000 \text{ об/мин.}$$

$$b = \frac{60 \cdot V_p}{2\pi m^2 z n_n} = \frac{60 \cdot 0,000682}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 7 \cdot 3000} = 0,015 \text{ м.}$$

Длина зуба шестерни

Рабочее давление масла в системе  $p=40\cdot 10^4$  Па.

Механический к.п.д. масляного насоса  $\eta_{м.н}=0,87$ .

Мощность, затрачиваемая на привод масляного насоса:

$$N_n=V_p p/(\eta_{м.н}\cdot 10^3)=0,000682\cdot 40\cdot 10^4/(0,87\cdot 10^3)=0,31 \text{ кВт.}$$

#### Д.1.2 Расчет масляного радиатора

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя  $Q_M=4530$  кДж/с.

Коэффициент теплоотдачи от масла к стенке радиатора  $\alpha_1=250$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Толщина стенки радиатора  $\delta=0,2$  мм=0,0002 м.

Коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda_{\text{теп}}=100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Коэффициент теплоотдачи от стенки радиатора к воде  $\alpha_2=3200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Коэффициент теплопередачи от масла к воде

$$K_m = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{\text{теп}} + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/250 + 0,0002/100 + 1/3200} = 232 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}).$$

Средняя температура масла в радиаторе  $T_{\text{м.ср}}=358 \text{ К}$ .

Средняя температура воды в радиаторе  $T_{\text{вод.ср}}=348 \text{ К}$ .

Поверхность охлаждения масляного радиатора, омываемая водой:

$$F_m = \frac{Q_m}{K_m (T_{\text{м.ср}} - T_{\text{вод.ср}})} = \frac{4530}{232(358 - 348)} = 2,01 \text{ м}^2.$$

## Д.2 Расчет элементов системы охлаждения

### Д.2.1 Расчет водяного насоса

Циркуляционный расход воды в системе охлаждения.[1]

$$G_{\text{жс}} = Q_{\text{в}} / (c_{\text{жс}} \rho_{\text{жс}} \Delta T_{\text{жс}}) = 69730 / (4187 \cdot 1000 \cdot 9,6) = 0,00173 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $\Delta T_{\text{ж}}=9,6 \text{ К}$  – температурный перепад воды при принудительной циркуляции.

Расчетная производительность насоса

$$G_{\text{жс.р}} = G_{\text{жс}} / \eta = 0,00173 / 0,82 = 0,00212 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $\eta=0,82$  – коэффициент подачи насоса.

Радиус входного отверстия крыльчатки

$$r_1 = \sqrt{G_{ж.п} / (\pi c_1) + r_0^2} = \sqrt{0,00212 / (3,14 \cdot 1,8) + 0,01} = 0,0193 \text{ м},$$

где  $c_1=1,8$  – скорость воды на входе в насос, м/с;  $r_0=0,01$  – радиус ступицы крыльчатки, м.

Окружная скорость потока воды на выходе из колеса

$$\begin{aligned} u_2 &= \sqrt{1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2} \sqrt{P_{ж} / (\rho_{ж} \eta_h)} = \\ &= \sqrt{1 + \operatorname{tg} 10^0 \operatorname{ctg} 45^0} \sqrt{120000 / (1000 \cdot 0,65)} = 14,7 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

где угол  $\alpha_1=10^0$ , а угол  $\beta_2=45^0$ ;  $\eta_h=0,65$  – гидравлический к.п.д. насоса.

Радиус крыльчатки колеса на выходе

$$r_2 = 30u_2 / (\pi m_{г.н}) = 30 \cdot 14,7 / (3,14 \cdot 4600) = 0,0305 \text{ м}.$$

Окружная скорость входа потока

$$u_1 = u_2 r_1 / r_2 = 14,7 \cdot 0,0193 / 0,0305 = 9,32 \text{ м/с}.$$

Угол между скоростями  $c_1$  и  $u_1$  принимается  $\alpha_1=90^0$ , при этом

$$\operatorname{tg} \beta_1 = c_1 / u_1 = 1,8 / 9,32 = 0,1956, \text{ откуда } \beta_1 = 10^0 15'.$$

Ширина лопатки на входе

$$b_1 = \frac{G_{ж.п}}{(2\pi r_1 - z \delta_1 / \sin \beta_1) \cdot 1,8} = \frac{0,00212}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,0193 - 4 \cdot 0,003 / \sin 10^0 15')} \cdot 1,8 = 0,0596 \text{ м},$$

где  $z=4$  – число лопаток на крыльчатке насоса;  $\delta_1=0,003$  – толщина лопаток у входа, м.

Радиальная скорость потока на входе из колеса

$$c_r = \frac{p_{жс} \operatorname{tg} \alpha_2}{\rho_{жс} \eta_h u_2} = \frac{120000 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ}{1000 \cdot 0,65 \cdot 14,7} = 2,2 \text{ м/с.}$$

Ширина лопатки на выходе

$$b_2 = \frac{G_{жс.p}}{(2\pi r_2 - z\delta_2 / \sin \beta_2) c_r} = \frac{0,00212}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,0305 - 4 \cdot 0,003 / \sin 45^\circ) \cdot 2,2} = 0,0037 \text{ м}$$

где  $\delta_2=0,003$  – толщина лопаток на выходе, м.

Мощность, потребляемая водяным насосом:

$$N_{в.н} = G_{жс.p} p_{жс} / (1000 \eta_m) = 0,00212 \cdot 120000 / (1000 \cdot 0,82) = 0,34 \text{ кВт},$$

где  $\eta_m=0,82$  – механический к.п.д. водяного насоса.

## Д.2.2 Расчет поверхности охлаждения водяного радиатора

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G_{возд} = Q_{возд} / (c_{возд} \Delta T_{возд}) = 69730 / (1000 \cdot 24) = 2,9 \text{ кг/с},$$

где  $\Delta T_{возд}=24$  – температурный перепад воздуха в решетке радиатора, К.

Массовый расход воды, проходящей через радиатор:

$$G_{жс} = G_{жс} \rho_{жс} = 0,00173 \cdot 1000 = 1,73 \text{ кг/с.}$$

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор:

$$T_{cp.возд} = \frac{T_{воздвх} + (T_{воздвх} + \Delta T_{возд})}{2} = \frac{313 + (313 + 24)}{2} = 325 \text{ K}.$$

где  $T_{возд.вх}=313$  – расчетная температура воздуха перед радиатором, К.

Средняя температура воды в радиаторе

$$T_{cp.вод} = \frac{T_{водвх} + (T_{водвх} - \Delta T_v)}{2} = 358,2 \text{ K},$$

где  $T_{вод.вх}=363$  – температура воды перед радиатором, К;  $\Delta T_v=9,6$  – температурный перепад воды в радиаторе, К.

Поверхность охлаждения радиатора

$$F = \frac{Q_{вод}}{K(T_{cp.вод} - T_{cp.возд})} = \frac{69730}{160(358,2 - 325)} = 11,51 \text{ м}^2,$$

где  $K=160$  – коэффициент теплопередачи для радиаторов легковых автомобилей, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Д.2.3 Расчет вентилятора

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе

$$\rho_{возд} = p_0 \cdot 10^6 / (R_g T_{cp.возд}) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 325) = 1,07 \text{ кг/м}^3.$$

Производительность вентилятора

$$G_{возд} = G_{возд} / \rho_{возд} = 2,9 / 1,07 = 2,71 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Фронтальная поверхность радиатора

$$F_{\text{фр.рад}} = G_{\text{возд}} / \omega_{\text{возд}} = 2,71 / 20 = 0,135 \text{ м}^2,$$

где  $\omega_{\text{возд}} = 20$  – скорость воздуха перед фронтом радиатора без учета скорости движения автомобиля, м/с.

Диаметр вентилятора

$$D_{\text{вент}} = 2\sqrt{F_{\text{фр.рад}} / \pi} = 2\sqrt{0,135 / 3,14} = 0,415 \text{ м}.$$

Окружная скорость вентилятора

$$u = \psi_{\text{л}} \sqrt{\Delta p_{\text{тр}} / \rho_{\text{возд}}} = 3,41 \sqrt{800 / 1,07} = 93,4 \text{ м/с},$$

где  $\psi_{\text{л}} = 3,41$  – безразмерный коэффициент для плоских лопастей.

Частота вращения вентилятора

$$n_{\text{вент}} = 60u / (\pi D_{\text{вент}}) = 60 \cdot 93,4 / (3,14 \cdot 0,415) = 4600 \text{ об/мин}.$$

Таким образом, выполнено условие  $n_{\text{вент}} = n_{\text{в.н}} = 4600$  об/мин (вентилятор и водяной насос имеют общий привод).

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора,

$$N_{\text{вент}} = G_{\text{возд}} \Delta p_{\text{тр}} / (1000 \eta_{\text{в}}) = 2,71 \cdot 800 / (1000 \cdot 0,38) = 5,7 \text{ кВт},$$

где  $\eta_{\text{в}} = 0,38$  – к.п.д. клепанного вентилятора.

### Д.3 Расчет механизма газораспределения

#### Д.3.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения при максимальном подъеме

$$F_{кл} = v_{н.ср} F_n / \omega_{ен} = 17,9 \cdot 54,5 / 140 = 5,85 \text{ см}^2$$

диаметр горловины клапана

$$d_{зоп} = \sqrt{4F_{зоп} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 11,026 / 3,14} = 3,75 \text{ см},$$

где  $F_{зоп} = 1,12F_{кл} = 1,12 \cdot 5,85 = 7,026 \text{ см}^2$ .

Из условия возможного размещения клапанов в головке при верхнем расположении диаметр горловины может достигать

$$d_{зоп} = 0,54D = 0,54 \cdot 82 = 34,23 \text{ мм}.$$

Максимальная высота подъема клапана при угле фаски клапана  $\alpha = 45^\circ$ .

$$h_{кл \max} = \sqrt{4,93d_{зоп}^2 + 4,44F_{кл} / 2,22} - d_{зоп} = \sqrt{4,93 \cdot 34,23^2 + 4,44 \cdot 9,85 / 2,22} - 34,23 = 10,6 \text{ мм}$$

#### Д.3.2 Основные размеры впускного кулачка

Радиус начальной окружности  $r_0 = (1,3 \dots 2,0)h_{кл \max} = 1,9 \cdot 10,6 = 20,1 \text{ мм}$ ; принимаем  $r_0 = 20 \text{ мм}$ ; максимальный подъем толкателя  $h_{т \max} = h_{кл \max} = 10,6 \text{ мм}$ , в данном механизме роль толкателя выполняет гидравлический толкатель, находящийся непосредственно в контакте с кулачком.

### Д.3.3 Профилирование безударного кулачка с плоским толкателем

Температурный зазор между клапаном и толкателем принимаем  $\Delta s=0,2$  мм, а затем определяем радиус окружности тыльной части кулачка

Протяженность участка сбега

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \omega_{\text{ток}}^2} = \frac{3,14 \cdot 0,2}{2 \cdot 180 \cdot 0,02} = 0,27416 \text{ рад} = 15^{\circ}42',$$

где  $\omega_{\text{ток}}=0,02$  мм/° – скорость толкателя в конце сбега, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков.

Протяженность других участков ускорения толкателя:  $\Phi_1=24^{\circ}$ ;  $\Phi_2=5^{\circ}7'$ ;  $\Phi_3=42^{\circ}23'$ .

Метод профилирования кулачка, называемый методом "полидайн", позволяет рассчитать перемещение толкателя и задается полиномом:

$$h_T = h_{T \text{ макс}} \left[ 1 + C_2 \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^2 + C_p \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^p + C_q \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^q + C_r \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^r + C_s \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^s \right].$$

В соответствии с этим определяют его скорость и ускорение:

$$V_T = h_{T \text{ макс}} \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) \left[ 2C_2 \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) + pC_p \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{p-1} + qC_q \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{q-1} + rC_r \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{r-1} + sC_s \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{s-1} \right] \cdot 10^{-3}$$

$$j_T = h_{T \text{ макс}} \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) \left[ 2C_2 + p(p-1)C_p \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{p-2} + q(q-1)C_q \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{q-2} + r(r-1)C_r \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{r-2} + s(s-1)C_s \left( \frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{s-2} \right] \cdot 10^{-3}$$

Угол  $\varphi_k$  в интервале  $\varphi_{p0} \leq \varphi_k \leq 0$  отсчитывается от вершины кулачка.

Постоянные коэффициенты  $C_2, C_p, C_r, C_s$  определяются следующим образом:

$$C_2 = -\frac{pqrs}{(p-2)(q-2)(r-2)(s-2)}; C_2 = \frac{2qrs}{(p-2)(q-p)(r-p)(s-p)};$$

$$C_2 = -\frac{2prs}{(q-2)(q-p)(r-q)(s-q)}; C_2 = \frac{2pqs}{(r-2)(r-p)(r-q)(s-r)};$$

$$C_2 = -\frac{2pqr}{(s-2)(s-p)(s-q)(s-r)}.$$

Параметры  $p, q, r, s$  обычно выбирают по закону возрастающей арифметической прогрессии с разностью  $p - 2$ .

Радиус кривизны профиля кулачка при плоском толкателе.

$$\rho = r_k - h_T + j_T$$

Показатель смазочного числа, характеризует устойчивость к износу, не должен превышать значения 0,15.

$$\rho_I = 1/\rho$$

Данные расчета представлены в таблице Д.1.

Таблица Д.1 - Профилирование безударного кулачка с плоским толкателем

$\varphi^0$ п.р.в.	$h_T$ , мм	$V_T$ , м/с	$j_T$ , м/с <sup>2</sup>	$\rho$	$\rho$	$\varphi^0$ п.р.в.	$h_T$ , мм	$V_T$ , м/с	$j_T$ , м/с <sup>2</sup>	$\rho$	$\rho$
-72	0,0000	0,0000	0,0000	19,8000	0,0505	-2	10,5415	0,0039	-0,5658	8,6927	0,1150
-70	0,0003	0,0002	0,1178	19,9175	0,0502	0	10,5547	0,0000	-0,5658	8,6795	0,1152
-66	0,0410	0,0081	1,1026	20,8616	0,0479	4	10,5019	-0,0077	-0,5658	8,7322	0,1145
-62	0,2799	0,0284	1,7249	21,2450	0,0471	8	10,3438	-0,0154	-0,5658	8,8904	0,1125
-60	0,5140	0,0402	1,7071	20,9931	0,0476	10	10,2251	-0,0193	-0,5658	9,0090	0,1110
-58	0,8270	0,0513	1,5285	20,5016	0,0488	12	10,0801	-0,0232	-0,5658	9,1541	0,1092
-56	1,2108	0,0608	1,2569	19,8461	0,0504	14	9,9087	-0,0270	-0,5658	9,3255	0,1072
-54	1,6531	0,0684	0,9499	19,0968	0,0524	16	9,7110	-0,0309	-0,5657	9,5233	0,1050
-52	2,1397	0,0738	0,6482	18,3085	0,0546	20	9,2365	-0,0386	-0,5651	9,9984	0,1000
-50	2,6565	0,0773	0,3759	17,5194	0,0571	22	8,9597	-0,0425	-0,5643	10,2760	0,0973
-48	3,1911	0,0791	0,1444	16,7533	0,0597	24	8,6566	-0,0463	-0,5627	10,5806	0,0945
-46	3,7325	0,0794	-0,0437	16,0238	0,0624	26	8,3274	-0,0502	-0,5600	10,9127	0,0916
-44	4,2721	0,0786	-0,1910	15,3369	0,0652	28	7,9720	-0,0540	-0,5552	11,2728	0,0887
-42	4,8029	0,0768	-0,3030	14,6941	0,0681	30	7,5908	-0,0577	-0,5474	11,6618	0,0857
-40	5,3197	0,0745	-0,3857	14,0946	0,0709	32	7,1841	-0,0614	-0,5350	12,0809	0,0828
-38	5,8186	0,0716	-0,4453	13,5361	0,0739	34	6,7525	-0,0650	-0,5158	12,5317	0,0798
-36	6,2969	0,0684	-0,4872	13,0160	0,0768	36	6,2969	-0,0684	-0,4872	13,0160	0,0768
-34	6,7525	0,0650	-0,5158	12,5317	0,0798	38	5,8186	-0,0716	-0,4453	13,5361	0,0739

-32	7,1841	0,0614	-0,5350	12,0809	0,0828	40	5,3197	-0,0745	-0,3857	14,0946	0,0709
-30	7,5908	0,0577	-0,5474	11,6618	0,0857	42	4,8029	-0,0768	-0,3030	14,6941	0,0681
-28	7,9720	0,0540	-0,5552	11,2728	0,0887	44	4,2721	-0,0786	-0,1910	15,3369	0,0652
-26	8,3274	0,0502	-0,5600	10,9127	0,0916	46	3,7325	-0,0794	-0,0437	16,0238	0,0624
-24	8,6566	0,0463	-0,5627	10,5806	0,0945	48	3,1911	-0,0791	0,1444	16,7533	0,0597
-22	8,9597	0,0425	-0,5643	10,2760	0,0973	50	2,6565	-0,0773	0,3759	17,5194	0,0571
-20	9,2365	0,0386	-0,5651	9,9984	0,1000	52	2,1397	-0,0738	0,6482	18,3085	0,0546
-16	9,7110	0,0309	-0,5657	9,5233	0,1050	56	1,2108	-0,0608	1,2569	19,8461	0,0504
-14	9,9087	0,0270	-0,5658	9,3255	0,1072	58	0,8270	-0,0513	1,5285	20,5016	0,0488
-12	10,0801	0,0232	-0,5658	9,1541	0,1092	60	0,5140	-0,0402	1,7071	20,9931	0,0476
-10	10,2251	0,0193	-0,5658	9,0090	0,1110	62	0,2799	-0,0284	1,7249	21,2450	0,0471
-8	10,3438	0,0154	-0,5658	8,8904	0,1125	66	0,0410	-0,0081	1,1026	20,8616	0,0479
-6	10,4360	0,0116	-0,5658	8,7981	0,1137	70	0,0003	-0,0002	0,1178	19,9175	0,0502
-4	10,5019	0,0077	-0,5658	8,7322	0,1145	72	0,0000	0,0000	0,0000	19,8000	0,0505

### Д.3.4 Время сечения клапана

Диаграммы подъема толкателя, построенные в масштабе по оси абсцисс  $M_{\text{фр}}=1^0/\text{мм}$ , по оси ординат  $M_{\text{нт}}=0,1 \text{ мм/мм}$ , являются диаграммами подъема клапана если изменить масштаб по оси ординат на

$$M_{h_{\text{кл}}} = h_{\text{кл max}} M_{h_{\text{нт}}} / h_{\text{нт max}} = 0,1 \text{ мм/мм.}$$

### Время – сечения клапана

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = M_t M_F F_{\text{abcd}}$$

где  $M_t = M_{\text{фр}} / (6n_p) = 1 / (6 \cdot 2800) = 5,952 \cdot 10^{-5} \text{ с/мм}$ ;

$$M_F = M_{h_{\text{кл}}} \cdot 2,22 d_{\text{зоп}} = 0,1 \cdot 2,22 \cdot 34,23 = 7,60 \text{ мм}^2/\text{мм};$$

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = 5,952 \cdot 7,60 \cdot 5129 = 2,32 \text{ мм}^2 \cdot \text{с},$$

где  $F_{\text{abcd}} = 5129 \text{ мм}^2$  – площадь под кривой подъема толкателя за такт впуска без учета площади, соответствующей выбору зазора 0,2 мм.

Средняя площадь проходного сечения клапана.

$$F_{\text{кл. ср}} = \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt / (t_2 - t_1) = M_F F_{abcd} / l_{ad},$$

где  $l_{ad}=90$  мм – продолжительность такта впуска по диаграммам:

$$F_{\text{кл. ср}} = 7,6 \cdot 5129 / 90 = 4,33 \text{ см}^2.$$

Средняя скорость потока смеси в седле клапана:

$$\omega_{\text{вн}} = v_{\text{н. ср}} \cdot F_n / F_{\text{кл. ср}} = 17,952 \cdot 53,5 / 4,33 = 220 \text{ м/с};$$

Полное время-сечение клапана

$$\int_{t_{\text{ин}}}^{t_x} F_{\text{кл}} dt = M_t M_F F_{\text{вн}} = 5,952 \cdot 7,6 \cdot 5648 = 2,7 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}.$$

где  $t_{\text{пр}}$  – момент начала открытия впускного клапана;  $t_x$  и  $F_x$  – текущие значения времени и площади под кривой подъема толкателя.

### 6.3.5 Расчет пружины клапана

Максимальная сила упругости пружин

$$P_{\text{прmax}} = K \cdot M_{\text{кл}} \cdot r_k \cdot \omega_p^2 / l m = 309 \text{ Н}$$

где  $K=1,4$  – коэффициент запаса;  $M_{\text{кл}} = m_{\text{кл}} + (m_{\text{пр}}/3) + m_{\text{тол}} = 130$  г – суммарная масса клапанного механизма.

Минимальная сила упругости пружины

$$P_{\text{прmin}} = K \cdot M_{\text{кл}} \cdot \omega_p^2 / l m = 156 \text{ Н}$$

Жесткость пружины

$$c = K \cdot M_{ки} \cdot \omega_p^2 = 15,6 \text{ кН/м.}$$

Деформация пружины:

- предварительная

$$f_{min} = 1,14r_0 - r_0 = 2,8 \text{ мм}$$

- полная

$$f_{max} = f_{min} + h_{клmax} = 13,35 \text{ мм.}$$

Размеры пружины (приняты по конструктивным соображениям):

- диаметр проволоки  $\delta_{пр} = 3,6 \text{ мм}$

- диаметр пружины  $D_{пр} = 25,7 \text{ мм.}$

Число рабочих витков пружины

$$i_p = \frac{G_2 \cdot \delta_{пр} \cdot f_{max} \cdot 10^{-2}}{8 \cdot P_{прmax} \cdot 10^{-6} \cdot D_{пр}^3} = 4,8$$

где  $G_2 = 8,9$  – модуль упругости второго рода,  $\text{МН/см}^2$ .

Полное число витков

$$i_n = i_p + 2 = 4,8 + 2 = 6,8$$

Шаг витка

$$t = \delta_{пр} + (f_{max}/i_p) + \Delta_{min} = 6,71 \text{ мм.}$$

где  $\Delta_{min} = 0,3$  наименьший зазор между витками пружины при полностью закрытом клапане, мм.

Длина пружины при полностью открытом клапане

$$L_{min} = i_n \cdot \delta_{np} + i_p \cdot \Delta_{min} = 25,73 \text{ мм.}$$

Длина пружины при полностью закрытом клапане

$$L_0 = L_{min} + h_{клmax} = 25,73 + 10,6 = 36,29 \text{ мм.}$$

Длина свободной пружины

$$L_{св} = L_{min} + f_{max} = 25,73 + 13,35 = 39,09 \text{ мм.}$$

Максимальные и минимальные напряжения в пружине

$$\tau_{max} := k'_B \cdot \frac{8 \cdot P_{прmax} \cdot D_{пр}}{\pi \cdot \delta_{пр}^3} \quad \tau_{max} = 536 \text{ МПа}$$
$$\tau_{min} := k'_B \cdot \frac{8 \cdot P_{прmin} \cdot D_{пр}}{\pi \cdot \delta_{пр}^3} \quad \tau_{min} = 271 \text{ МПа}$$

где  $k'_B = 1,235$ .

Средние напряжения и амплитуды напряжений

$$\tau_m := \frac{|\tau_{max} + \tau_{min}|}{2} \quad \tau_m = 403.3 \text{ МПа}$$
$$\tau_a := \frac{|\tau_{max} - \tau_{min}|}{2} \quad \tau_a = 132.6 \text{ МПа}$$

Так как концентрация напряжений в витках пружины учитывается коэффициентом  $k'$ , а  $k_t / (\epsilon_M \epsilon_P) \approx 1$ , то

$$\tau_{ак} := \tau_a \cdot A \quad \tau_{ак} = 132.6 \text{ МПа}$$

## Запас прочности пружины

$$n_{\tau} := \frac{\tau_1}{\tau_{ак} + \alpha_{\tau} \cdot \tau_m} \quad n_{\tau} = 1.64$$

где  $\alpha_{\tau}=0,2$  определяется по табл. 43 [1].

Расчет пружин на резонанс:

$$n_c := 2.17 \cdot 10^7 \cdot \frac{\delta_{пр}}{(i_p \cdot D_{пр}^2)} \quad n_c = 24890$$
$$\frac{n_c}{n_p} = 8.89$$

### 6.3.6 Расчет распределительного вала

Максимальная сила от выпускного клапана, действующая на кулачок:

$$P_{T.max} := \left[ P_{прmax} + \frac{\pi \cdot d_B^2 \cdot |p_{\Gamma} - p_0|}{4} \right] + M_{\Gamma} \cdot \omega_K^2 \cdot r_K \cdot 10^{-5} \quad P_{T.max} = 2846 \text{ Н}$$

$$M_{\Gamma} := \left( m_{кл} + \frac{m_{пр}}{3} \right) + m_{тол} \quad M_{\Gamma} = 130 \text{ г}$$

Стрела прогиба распределительного вала

$$y := 0.8 \cdot \frac{P_{T.max} \cdot a^2 \cdot b^2}{E \cdot l \cdot (d_p^4 - \delta_p^4)} \quad y = 0.00155 \text{ мм}$$

где  $E=2,2 \cdot 10^5$  Мпа – модуль упругости стали.

## Напряжение смятия

$$\sigma_{\text{см}} := 0.418 \cdot \sqrt{P_{\text{т.мах}} \cdot \frac{E}{b_{\text{к}} \cdot r_0}} \quad \sigma_{\text{см}} = 410 \text{ МПа}$$

где  $b_{\text{к}}=14,8$  мм – ширина кулачка.



